

SÉRIE A, N° 1041

N° D'ORDRE

1064

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

Bernard LEROY

PREMIÈRE THÈSE

Réalisation d'un pointeur solaire automatique

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 8 mars 1963 devant la Commission d'examen

MM. VASSY

BRICARD

DELLOUE

}

Président

Examineurs

SÉRIE A, N° 1041

N° D'ORDRE

1064

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

Bernard LEROY

PREMIÈRE THÈSE

Réalisation d'un pointeur solaire automatique

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 8 mars 1963 devant la Commission d'examen

MM. VASSY

BRICARD

DELLOUE

Président

Examineurs



FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PROFESSEURS

Doyen ZAMANSKY

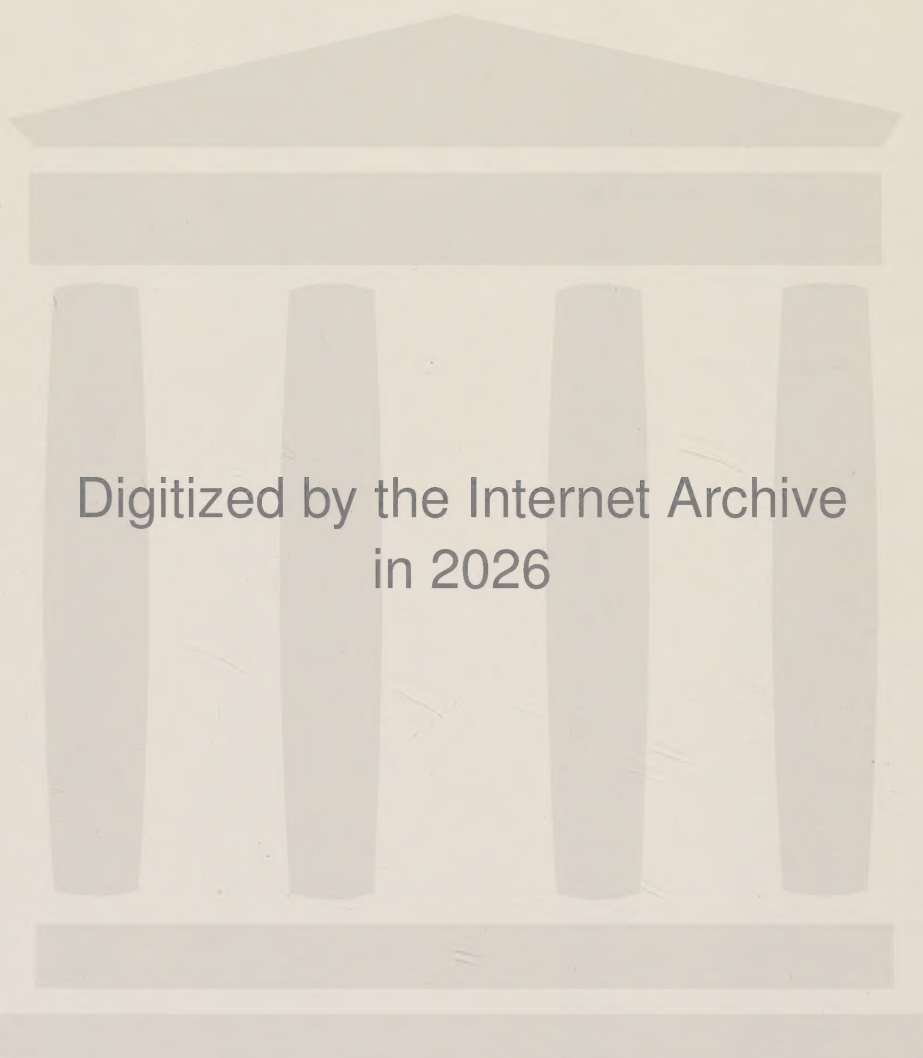
G. JULIA	T Analyse supérieure et Algèbre supérieure	NOIROT	Evolution des êtres organisés
PRENANT	T Anatomie et Histologie comparée	PANNETIER	T Chimie (Orsay)
GRASSE	T Evolution des êtres organisés	POSSOMPES	T Biologie animale (P.C.B.)
PREVOST	T Chimie organique	PULLMANN	T Chimie théorique
WYART	T Minéralogie et Cristallogr.	TEILLAC	T Physique nucléaire et radioactivité
TEISSIER	T Zoologie	TONNELAT	T Biol. physico-chimique
MANGENOT	T Biologie végétale (Orsay)	VILLE	T Econométrie
P. AUGER	T Physique quantique et relativité	WILLEMART	T Chimie (P.C.B.)
MONNIER	T Physiologie des Fonctions	DOPE	T Chimie (Orsay)
PIVETEAU	T Paléontologie	FREYMANN	T Physique (S.P.C.N.)
ROCARD	T Physique (E.N.S.)	GUINCHET	T Biol. Vég. (Orsay)
CARTAN	T Mathématiques (E.N.S.)	ROLLET	T Chimie (P.C.B.)
LAFFITTE	T Chimie Générale	Mlle JOSIEN	T Chimie (P.C.B.)
FAVARD	T Géométrie supérieure	CHEVALLEY	T Géométrie algébrique et théorie des groupes
COULOMB	T Physique du Globe	ARNOULT	T Electronique (Orsay)
Mlle COUSIN	T Biologie	CHAPELLE	T Physique (Orsay)
CHRETIEN	T Chimie minérale	DELANGE	T Mathématiques (Orsay)
DRACH	T Zoologie	DENY	T Mathématiques générales (Orsay)
KASTLER	T Physique (E.N.S.)	GERMAIN	T Mécanique théorique des fluides
EPHRASSI	T Génétique	LUCAS G.	T Géologie
RIVIERE	T Géologie (Orsay)	ALLARD	T Chimie Physique
GAUTHERET	T Biologie (PCB)	BERTHELOT	T Physique fondamentale des Hautes Energies (Orsay)
R. LUCAS	T Recherches Physiques	BRICARD	T Métécologie
A. THOMAS	T Biol. cellulaire	Mme ALBE-FESSARD	T Psychophysiol.
ARNULF	T Optique appliquée	FRIEDEL	Physique des Solides (Orsay)
M. MORAND	T Physique Enseignement	M. JULIA	T Chimie Organ. Structurale
SOLEILLET	T Physique (P.C.B.)	LENDER	T Biol. Animale (S.P.C.N.) (Orsay)
FORTIER	T Mécanique expérimentale des fluides	MAGAT	Physico-chimie des Rayonnements
DANJON	T Astronomie	Mlle QUINTIN	T Electrochimie
PETIT	T Biologie maritime	MONOD	T Biochimie cellulaire
QUENEY	T Métécologie et dynamique atmosphérique	BERNOT	T Physiologie animale (Orsay)
GALLIEN	T Embryologie	DE POSSEL	T Analyse numérique
EICHHORN	T Biologie végétale (P.C.B.)	CHARLOT	T Chimie analytique
DE CUGNAC	T Biologie végétale (S.P.C.N.)	LEMEY	T Physiologie B.M.P.V. (Orsay)
Mlle CAUCHOIS	T Chimie Physique	GUERN	T Chimie (Orsay)
THELLIER	T Physique du Globe	CHATELET M.	T Chimie (P.C.B.)
L'HERITIER	T Biologie Générale (Orsay)	JEAN	T Physique (Orsay)
GRIVET	T Radioélectricité (Orsay)	MATTLER	T Physique (Orsay)
PONCIN	T Mécanique générale	BERGERARD	T Biol. Adm. (S.P.C.N.) (Orsay)
DUBREIL	T Arithmétique et théorie des nombres	BERTEIN	T Electronique (Orsay)
QUELET	T Chimie organique	BOUSSIÈRES	T Chimie des Radioéléments (Orsay)
CAGNIARD	T Géophysique appliquée	Mme COUTURE	Thermodynamique et Mécanique Physique
CHAMPETIER	T Chimie macromolécul.	ELLENBERGER	Géologie appliquée
CUVILLIER	T Micropaléontologie	FRANC	T Biologie animale (P.C.B.)
JUNG	T Pétrographie	SCHNELL	T Botanique tropicale (Orsay)
TRILLAT	T Microscopie et diffract. électronique	STOLKOWSKI	T Physiologie animale (P.C.B.)
WIEMANN	T Chimie organique et structurale	ACHER	T Chimie Biologique (Orsay)
JACQUINOT	T Spectroscopie (Orsay)	BAUDOUIN	T Biologie
VASSY	T Physique de l'atmosphère	BEAUMONT	T Biologie animale
DESTOUCHES	T Théories physiques	BLAMONT	T Géophysique Ionosphère
AMIEL	T Chimie des solides	BOURREAU	T Biologie Végétale S.P.C.N. (Orsay)
HOCART	T Minéralogie et Cristallogr.	CURIE D.	T Physique (M.G.P.)
J.P. MATHIEU	T Recherches Physiques	DURAND-DELGA	T Géologie
COUTEAUX	T Biol. animale (PCB)	PREON	T Chimie Organique (Orsay)
MAY	T Zoologie (Orsay)	HELLER	T Physiologie végétale
CHOQUET	T Théor. des fonctions et Topologie	TORTRAT	T Calcul des Probabilités
FELDMANN	T Biol. végétale (P.C.B.)	CAILLEUX	T Géologie (S.P.C.N.)
GUINIER	T Physique des solides (Orsay)	MAGNAN	T Physique (P.C.B.)
JOST	T Physiologie comparée	DAUDEL	T Chimie Ondulatoire appliquée à la chimie théorique et à la Physique Nucléaire
FORTET	T Calcul des Probabilités	Mlle FOURCROY	T Biologie Végétale (S.P.C.N.)
SCHWARTZ	T Calc. diff. et intégr.	Mme CHOQUET-BRUHAT	T Mécan. Analytique et méca. céleste.
CHOUARD	T Physiologie végétale	Mlle VEIL	T Physiologie Générale
MALAVARD	T Aviation (Techn. Aéronaut.)	LWOFF	T Microbiologie
BRELOT	T Calcul différentiel	SIESTRUNK	T Mécanique physique et Expérimentale
NORMANT	T Synthèse organique générale	LACOMBE	T Métallurgie (Orsay)
BERNARD	T Chimie (E.N.S.C.P.)	BROCHARD	T Physique P.C.B. (Orsay)
BUVAT	T Botanique (E.N.S.)	CABANNES	T Mécanique générale
DUGUE	T Statistiques mathém.	LESIEUR	T Mathématiques M.P.C. (Orsay)
SOULAIRAC	T Psychophysiology	MAZET	T Mécanique générale (Orsay)
ULRICH	T Physiologie végétale (E.N.S.)	COMOLET	T Géographie phys. et Géol. Dynamique
KIRRMANN	T Optique théorique et appliquée	CORABOEUF	T Mécanique des fluides
CHADEFAUD	T Théories chimiques	DELLOUE	T Physiologie animale Orsay
Mlle LE BRETON	T Botanique	GORENFFLOT	T Physique de l'atmosphère
SALEM	T Physiologie	HOULLON	T Botanique II (Orsay)
LELONG	T Mathématiques générales	Mlle JULIEN J.	T Biologie animale PCB
DEVILLERS	T Anatomie et Histol. comparées	MALGRANGE	T Chimie SPCN (Orsay)
EHRESMANN	T Topologie algébrique	OLIVIER	T Technique Math. de la Physique (Orsay)
FRANÇON	T Physique (S.P.C.N.)	NOZERAN	T Astronomie
CLANGAUD	T Géogr. physique et Géologie dynamique	BLANC-LAPIERRE	T Botanique II (Orsay)
CODEMENT	T Mathématiques (M.P.C.)	CHEVAUGEON	T Physique ENS (Orsay)
PISOT	T Calcul des Probabilités	KAHANE	T Botanique (Orsay)
ROCH	T Géologie	SAMUEL	T Mathématiques (Orsay)
SCHATZMANN	T Astrophysique	KOURGANOFF	T Mathém. ENS féminines
TERMIER	T Paléontologie stratigraphique	THIRY	T Astronomie (Orsay)
ZAMANSKY	T Mathématiques générales	ABELES	T Mécanique céleste
LENNUIER	T Physique (P.C.B.)	AMAT	T Physique SPCN
RIZET	T Génétique (Orsay)	AUBOIN	T Physique PCB
ROUTHIER	T Géologie appliquée	Mme BENOIT-GUEUTAL	T Géologie
Mme TONNELAT	T Relativité	BOUGIS	T Physique Nucl. et radioactivité
DIXMER	T Mathématiques (MPC)	BRUHAT	T Physique Nucl. (Villefranche/mer)
SOUCHAY	T Chimie (P.C.B.)	BRUNN	T Mathématique MPC
AIGRAIN	T Electrotechn. générale	CHABBAL	T Géologie historique (Orsay)
BRUSSET	T Chimie minérale	DEREUVELS	T Géologie MGP (Orsay)
M. LEVY	T Physique théorique des hautes énergies (Orsay)	D'ESPAGNAT	T Mathématique Propé (Orsay)
Mme CHAIX	T Chimie biologique	FURON	T Physique théorique (Orsay)
Mme HUREL-PY	T Biol. vég. (P.C.B.)	Mme GANS	T Géologie SPCN
PIAUX	T Chimie (S.P.C.N.)	GENEVES	T Génétique
BRUN	T Mécanique exper. des Fluides	CUILBERT	T Biologie végétale PCB
LEDERER	T Chimie biologique	HUPE	T Physique (CUS Orléans)
Mme DUBREIL	T Mathématiques (Agrég.)	HOLLANDE	T Pétrographie
Mme LELONG	T Mathem. (E.N.S.)	LIONS	T Biologie générale
BELLAIR	T Géologie (S.P.C.N.)	MAITTE	T Analyse numérique
COTTE	T Physique (M.P.C.)	MEYER	T Chimie PCB
DUBOIS J.E.	T Chimie (M.P.C.)	NICOLAS	T Physique propédeutique
LAMOTTE	T Zoologie (E.N.S.)	PANUGEL	T Géologie appliquée
MICHEL André	T Chimie Minérale (Orsay)	RAVIER	T Biologie générale
OLMER	T Energétique Gie	ROSEAU	T Pétrographie
ROUAULT	T Physique	ROUBINE	T Mécanique théor. des Fluides
GAUTHIER	T Mécanique appliquée	SILBER	T Electronique
BARCHEWITZ	T Chimie Physique	UEBERSFELD	T Chimie P.C.B.
BROSSEL	T Physique atomique	YVON	T Electronique
BUSER	T Biologie animale (P.C.B.)		T Théories Physiques.
CAMUS	T Biologie végétale (P.C.B.)		
CASTAING	T Physique (Orsay)		
CURIEN	T Minéralogie et cristallographie		
MOYSE	T Physiol. Vég. (Orsay)		

Secrétaire général R. POUILLAIN

A la mémoire de mon père.

A ma mère.

A ma femme.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550205_0036

Ce travail a été effectué au laboratoire de Physique de l'Atmosphère de la Faculté des Sciences de Paris.

Que Monsieur le Professeur E. VASSY qui dirige ce laboratoire, ainsi que Madame A. VASSY trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude. Je leur suis également reconnaissant de la bienveillance qu'ils m'ont toujours manifestée depuis que je travaille au laboratoire de Physique de l'Atmosphère.

Je remercie également pour l'aide qui m'a été apportée dans la réalisation de ce travail les techniciens et le personnel du laboratoire, ainsi que Monsieur Robert FRESNAY, Ingénieur des travaux à la Météorologie Nationale pour les conseils qu'il m'a donnés.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION	9
Chapitre I - POINTEUR SOLAIRE	11
A - Dispositif d'approche	12
1 - Principe de réalisation	12
2 - Choix des cellules	13
a) Rappel de quelques notions théoriques	13
b) Sensibilité spectrale	14
c) Etude du courant	15
d) Détermination de l'ensemble cellules-relais	17
3 - Réalisation pratique du dispositif d'approche	20
B - Dispositif de réglage fin	22
1 - Premier dispositif de réglage optique	23
2 - Précision obtenue	25
3 - Second dispositif ; précision du réglage	27
4 - Modification du dispositif d'approche	30
5 - Commande des moteurs et circuits auxiliaires	30
6 - Générateur d'impulsions	33
C - Réalisation de l'ensemble de l'appareil	35
Chapitre II - HELIOSTAT	41
A - Etude théorique du mouvement relatif	41
Cas général	41
B - Mouvement relatif	44
Cas particuliers	44
C - Différentes réalisations possibles	47
Chapitre III - NOUVEAU DISPOSITIF POUR LA COMMANDE DU POINTEUR SOLAIRE	51
A - Amplification du courant des photopiles	51
B - Caractéristiques des nouveaux relais	52
C - Caractéristiques des moteurs "Servalco"	52
D - Modifications du dispositif optique	53
E - Conclusion	56

INTRODUCTION

En Physique de l'Atmosphère, l'utilisation du Soleil comme source d'énergie lumineuse est très fréquente, que ce soit pour l'étude des variations de cette énergie et de sa répartition spectrale ou, grâce à certains phénomènes optiques, pour l'étude de la composition de l'atmosphère : ozone, vapeur d'eau, etc.

La précision des mesures et la nécessité d'obtenir une variation continue dans le temps des différentes grandeurs étudiées nécessite l'utilisation d'un rayonnement incident géométriquement fixe par rapport au récepteur utilisé : cellule photoélectrique, pile thermoélectrique, émulsion photographique.

L'emploi d'un héliostat est donc nécessaire pour ces différentes mesures. Le plus couramment utilisé est un dispositif mécanique à mouvement d'horlogerie possédant un ou deux miroirs, qui, grâce à différentes combinaisons de mouvements permet d'obtenir un rayon réfléchi fixe lorsque la mise en station de l'appareil a été effectuée correctement. De cette mise en station dépend le bon fonctionnement de l'appareil ; plusieurs réglages sont en général prévus : latitude, date, (intervention de la déclinaison solaire), heure. Une régulation parfaite du mouvement d'horlogerie ainsi que l'horizontalité de la base où repose l'appareil sont nécessaires. Une faible erreur sur l'un de ces réglages entraîne un déplacement du rayon réfléchi au cours du temps et par conséquent une surveillance fréquente de l'appareil devient indispensable.

D'autre part, si nous admettons que la mise en station est parfaite, ces réglages ne seront valables que pour une durée limitée (au plus 24 heures) et si nous voulons obtenir des enregistrements continus sur l'appareil de mesure, il devient nécessaire de procéder au moins une fois par jour à la remise en station de l'héliostat.

Pour remédier à ces inconvénients, nous avons étudié un appareil basé sur l'utilisation de cellules photoélectriques, celles-ci permettant à chaque instant d'orienter un dispositif optique vers le Soleil avec une grande précision angulaire. Par son principe même, l'appareil ne nécessite aucune mise en station préalable à son utilisation : la position initiale pouvant être quelconque par rapport au Soleil, un double système de commande permettant successivement d'obtenir une orientation approchée, puis une orientation précise afin de suivre le déplacement apparent du Soleil d'une manière continue.

La première partie de ce travail sera consacrée à l'étude et à la réalisation d'un pointeur solaire auquel peuvent être liés différents instruments de mesure qui, par l'intermédiaire du dispositif optique à cellules, suivront le déplacement du Soleil.

La deuxième partie aura pour but de relier au déplacement du système optique, la rotation d'un miroir qui, donnant un rayon réfléchi géométriquement fixe, transformera ainsi le pointeur solaire en héliostat.

Enfin la troisième partie aura pour objet la réalisation d'un héliostat automatique basé sur l'utilisation de photodiodes et de transistors permettant

une miniaturisation de l'appareil et le rendant indépendant d'une alimentation extérieure (secteur) par l'emploi de piles ou d'accumulateurs spéciaux.

Cet appareil d'encombrement et de poids réduits pourra servir à équiper un ballon sonde pour des mesures à effectuer dans la stratosphère : mesures rendues difficiles par suite des mouvements propres de la nacelle du ballon. De même il pourra être utilisé à bord d'une fusée.

CHAPITRE I

POINTEUR SOLAIRE

Le problème fondamental d'ordre cinématique qui se pose pour la réalisation du pointeur solaire est le suivant : maintenir dans une direction déterminée et variable au cours du temps (celle du Soleil) un dispositif optique avec le minimum d'erreur possible. Ce dispositif peut être figuré par un vecteur glissant dirigé suivant son axe, lequel pivote autour d'un point fixe O. Si nous prenons 3 axes de coordonnées rectangulaires Ox, Oy, Oz (figure 1), la position de l'axe est définie par les projections du vecteur unité OS sur ces 3 axes soit, en coordonnées polaires :

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta \cos \varphi \\ y = \rho \cos \theta \sin \varphi \\ z = \rho \sin \theta \end{cases} \quad \text{où} \quad \rho = 1$$

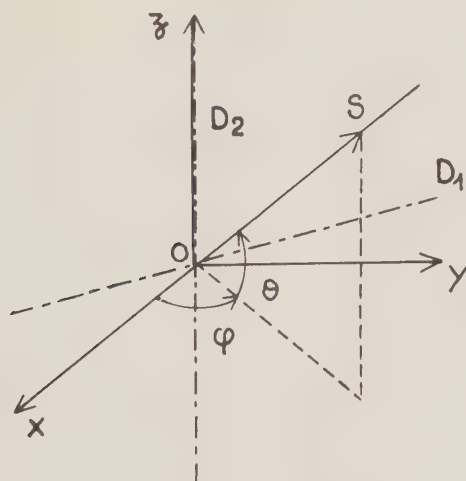


Figure 1

→ Les 2 angles θ et φ déterminent donc la direction dans l'espace de l'axe OS : 2 rotations, l'une effectuée par exemple autour de l'axe vertical Oz et l'autre autour d'un second axe situé dans le plan horizontal et perpendiculaire à OS amèneront la coïncidence de OS avec la direction du Soleil.

Ces deux rotations seront donc obtenues grâce à deux moteurs, le premier dont l'axe de commande D₂ est vertical faisant tourner un plateau horizontal sur lequel est fixé un second moteur dont l'axe horizontal D₁ portera le dispositif optique qui lui sera perpendiculaire, c'est-à-dire l'axe OS. L'appareil sera donc essentiellement constitué par ces deux moteurs dont les rotations devront être commandées par le dispositif optique de manière à ce que l'axe de celui-ci soit constamment dirigé vers le Soleil. Le problème posé par

cette orientation peut se décomposer en deux parties distinctes : en effet, la position initiale de l'axe au début de la mise en service de l'appareil peut-être quelconque, il faut donc pouvoir l'amener rapidement au voisinage de la direction réelle du Soleil avec une marge d'erreur sur les angles θ et φ dont on aura fixé la valeur maximum. Cette première condition étant obtenue, un second dispositif se substituera au premier de manière à réaliser l'orientation exacte de l'axe avec l'erreur la plus faible possible.

A - DISPOSITIF D'APPROCHE -

1 - Principe de réalisation.

Il doit permettre par rotation des deux moteurs, d'amener l'axe optique au voisinage de la direction réelle du Soleil. Si nous considérons un cylindre dont l'axe coïncide avec cette direction, l'éclairement de sa surface sera sensiblement le même en tous ses points, les différences provenant de la réflexion de la lumière sur les objets environnants, en particulier le sol. A ce moment, la surface du cylindre ne reçoit la lumière solaire directe que sous une incidence rasante. Un décalage de l'axe par rapport à la direction du Soleil provoque donc une augmentation plus ou moins grande de cet éclairement sur une partie de la surface du cylindre, éclairement prépondérant par rapport à la lumière diffusée ou réfléchie. Si nous disposons convenablement sur la surface du cylindre plusieurs cellules, il est donc possible d'obtenir plusieurs signaux électriques qui dépendront de la direction de son axe par rapport à celle du Soleil. Ces signaux détermineront par l'intermédiaire de différents relais la mise en marche des deux moteurs dans le sens convenable.

La solution la plus simple du problème consiste donc à associer à chacun de ces deux moteurs un couple de cellules de telle manière qu'à l'équilibre le signal électrique résultant de ces cellules soit nul, le déséquilibre provoquant l'apparition d'un signal positif ou négatif, suivant que l'une de ces cellules reçoit un éclairement supérieur ou inférieur à l'autre. Ce signal agira directement ou après amplification, sur un relais polarisé qui commandera au moyen de relais auxiliaires le moteur correspondant dans un sens ou dans l'autre suivant la polarité du signal reçu.

La position de chacun des couples de cellules sur le cylindre envisagé plus haut n'est pas quelconque : en effet, considérons un de ces couples (C_1 , C'_1) et l'axe de rotation (D_1) du moteur M_1 qu'il commande (figure 2); cet axe

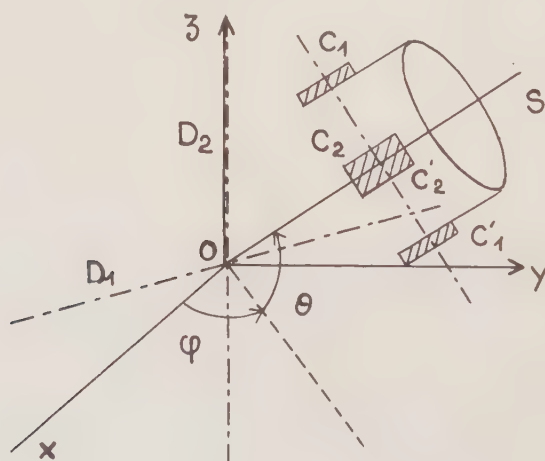


Figure 2

étant celui du plan horizontal (x, o, y). Il est évident que par raison de symétrie C_1 et C'_1 seront diamétralement opposées. D'autre part pour qu'une variation $\Delta\theta$ de l'angle θ donne une variation maximum de la différence d'éclairement entre C_1 et C'_1 obtenue par la lumière solaire directe, il faut que le diamètre du cylindre joignant les centres de C_1 et C'_1 soit normal au plan déterminé par D_1 et OS . De même pour le couple (C_2, C'_2) le diamètre correspondant sera perpendiculaire au plan formé par D_2 et OS , D_2 axe de rotation du moteur étant confondu avec l'axe vertical Oz .

Les plans ($D_1, \overrightarrow{OS}$) et ($D_2, \overrightarrow{OS}$) sont normaux ; en effet D_1 situé dans le plan xOy est perpendiculaire à D_2 (axe Oz) et à OS . Tout plan contenant D_1 sera perpendiculaire au plan ($D_2, \overrightarrow{OS}$) et en particulier ($D_1, \overrightarrow{OS}$).

Les deux diamètres joignant les centres de C_1, C'_1 et de C_2, C'_2 étant normaux respectivement aux 2 plans ($D_1, \overrightarrow{OS}$) et ($D_2, \overrightarrow{OS}$) seront perpendiculaires entre eux.

La position des deux couples de cellules (C_1, C'_1) et (C_2, C'_2) est ainsi parfaitement définie : ils seront situés respectivement sur deux diamètres perpendiculaires du cylindre d'axe $\overrightarrow{OS}$, l'un de ces diamètres, celui de (C_2, C'_2) étant parallèle à l'axe D_1 du moteur M_1 puisque D_1 est normal au plan ($D_2, \overrightarrow{OS}$).

Le couple (C_1, C'_1) commandera ainsi la rotation du moteur M_1 d'axe D_1 situé dans le plan horizontal et le couple (C_2, C'_2) la rotation du moteur M_2 d'axe D_2 vertical.

Etudions maintenant la réalisation de ce dispositif et sa liaison avec les deux moteurs.

2 - Choix des cellules.

Ce choix dépend ici de plusieurs facteurs : sensibilité à la lumière, réponse spectrale, constance des caractéristiques dans le temps, dimensions et forme géométrique. La source d'énergie lumineuse utilisée étant ici le Soleil, le problème de la sensibilité à la lumière ne pose aucune difficulté. Par contre, le principe même du fonctionnement de l'appareil impose aux cellules une forme géométrique déterminée : la cathode doit se présenter sous forme d'une surface plane, aucun autre élément ne faisant écran à la lumière incidente. La solution envisagée consiste à utiliser les cellules photo-électriques dites à couche d'arrêt ou photopiles.

a) Rappel de quelques notions théoriques concernant les cellules.

Elles reposent sur l'effet photovoltaïque à la zone de contact de deux corps différents tels que semi-conducteur et métal ou semi-conducteur et semi-conducteur. La lumière fait apparaître une différence de potentiel génératrice d'un courant dans le circuit extérieur si celui-ci est fermé. Cet effet se superpose d'ailleurs à l'effet photoconducteur qui résulte de l'accroissement sous l'action de la lumière de la conductibilité électrique des semi-conducteurs.

Des considérations théoriques montrent qu'au contact de deux semi-conducteurs de type p et n, existe une barrière de potentiel appelée barrière de Schottky constituant la couche d'arrêt. Cette jonction étant éclairée par un rayonnement lumineux de longueur d'onde convenable, il y a apparition d'une différence de potentiel par suite de l'absorption des photons lumineux. L'étude des propriétés de cette couche d'arrêt conduit à associer à chaque cellule un schéma équivalent (figure 3).

G représente un générateur d'électrons en quantité proportionnelle à l'éclairement et de résistance interne infinie. C est la capacité produite par l'existence des charges d'espace, r est la résistance de la barrière de potentiel et r' la résistance de conduction totale des électrons ($r' \ll r$). Quand la jonction est éclairée, r diminue et la capacité C qui peut être évaluée par $\frac{Q}{\varphi}$ (Q : charge d'espace, φ : hauteur de la barrière de potentiel) augmente.

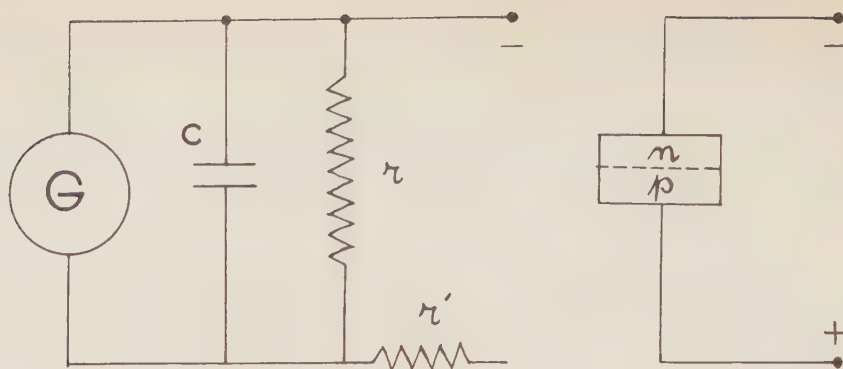


Figure 3

L'effet photovoltaïque se manifeste donc par l'apparition d'une différence de potentiel quand la jonction est éclairée. Voyons comment se comportent à ce sujet les différentes longueurs d'onde du rayonnement d'une part et d'autre part, quel est le courant circulant dans le circuit extérieur, celui-ci étant fermé.

b) Sensibilité spectrale des photopiles au sélénium (S_λ).

Elle est influencée par la nature de la couche d'arrêt. Pour les cellules utilisées dans cette réalisation le maximum de sensibilité est situé aux environs de $0,55\mu$ et la courbe de sensibilité s'étend un peu en deçà de $0,4\mu$ et un peu au-delà de $0,7\mu$ (figure 4).

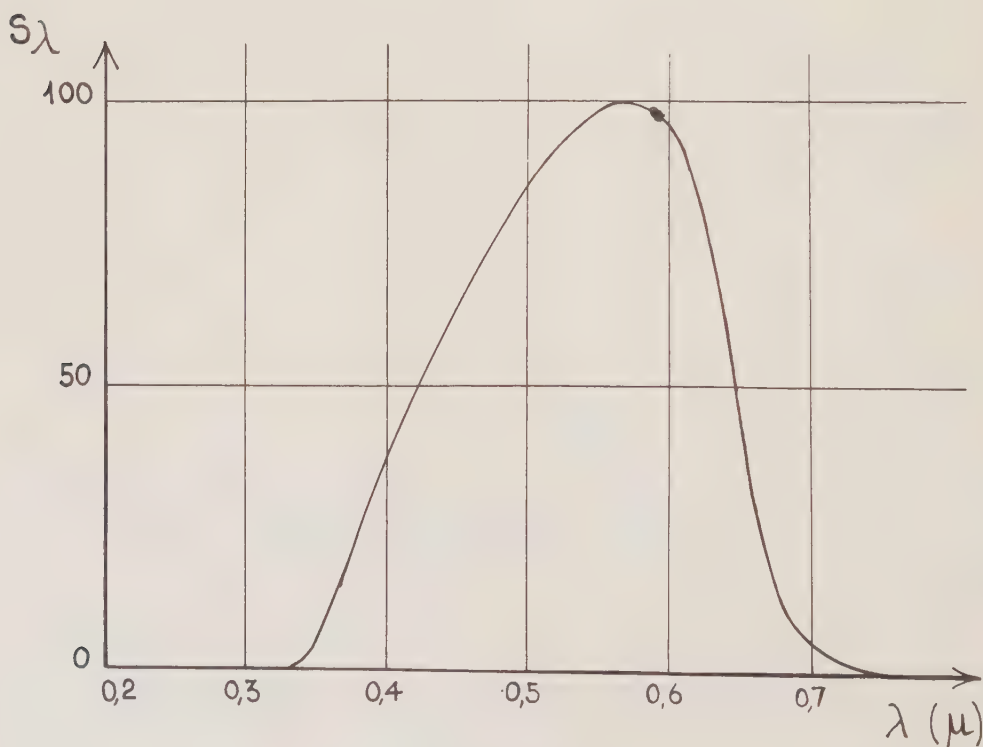


Figure 4

Cette courbe de sensibilité spectrale peut subir une modification avec la nature de l'éclairement (intense ou faible) et sa répartition spectrale, plus particulièrement lorsque la cellule reçoit un rayonnement infra-rouge de l'ordre de $0,76\mu$; la température a également une influence mais dans les conditions de l'emploi ces modifications seront négligeables.

c) Etude du courant circulant dans le circuit extérieur.

En pratique la cellule sera reliée à un circuit extérieur possédant une résistance ohmique R (relais par exemple) : nous nous bornerons ici à envisager l'étude du régime statique ou lentement variable ; il s'agit alors d'un problème de courant continu avec des éléments non linéaires ne suivant pas la loi d'Ohm.

Reprenons la figure 3. Soit R la résistance extérieure. Le passage du courant i dans R crée aux bornes de la couche d'arrêt une d.d.p. $v = i(R + r')$ et celle-ci produit dans la couche d'arrêt le passage d'un courant $i' = v/r$: le courant photoélectrique total (qui est toujours proportionnel à l'éclairement) vaut $I = i + i'$.

L'écart à la linéarité peut être caractérisé par :

$$\frac{I - i}{I} = \frac{R + r'}{R + r + r'}$$

r résistance interne n'est pas linéaire et décroît fortement lorsque la tension aux bornes augmente. De cette formule, nous en déduisons que l'écart à la linéarité sera d'autant plus grand que la résistance extérieure R sera plus grande, que la résistance de conduction r' sera plus grande et que la résistance interne r sera plus petite. Pour un circuit donné comme r diminue lorsque la tension aux bornes augmente, r diminuera lorsque l'éclairement augmentera ; il en sera de même de la linéarité. On peut représenter l'ensemble des résultats par un réseau de courbes telles que celles de la figure 5.

Ce graphique n'est d'ailleurs valable que pour un type de cellule donnée.

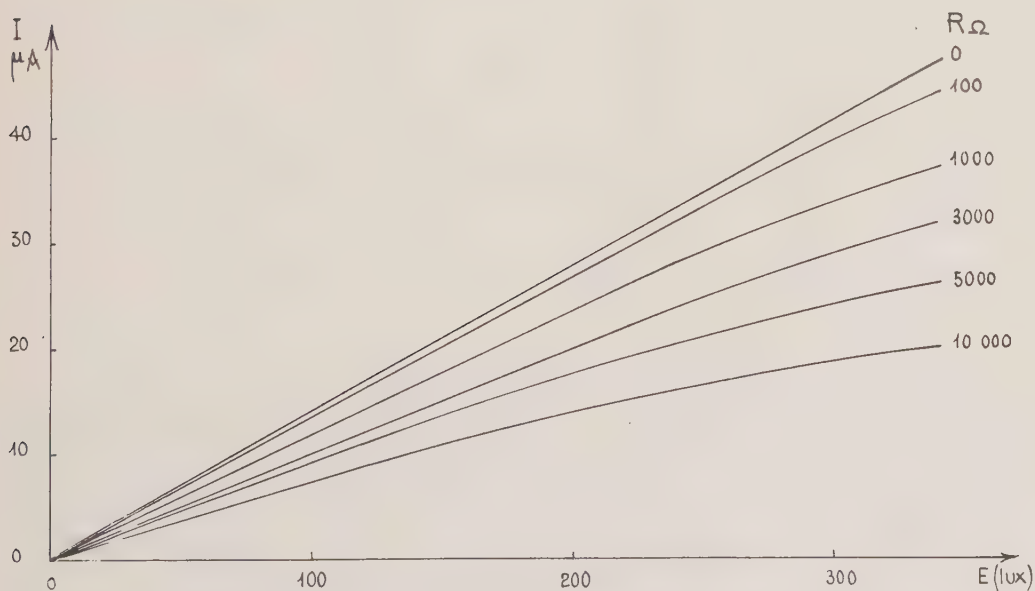


Figure 5

Il est possible d'autre part de déterminer empiriquement une relation simple donnant le courant débité i par une photopile sur une résistance de charge quelconque R en connaissant pour l'éclairement considéré le courant de court-circuit et la force électromotrice à vide. Cette relation est de la forme :

$$i = \frac{V_{\infty}}{R + \frac{V_{\infty}}{i_0}} \quad (1)$$

où V_{∞} est la force électro-motrice à vide,

et i_0 le courant de court-circuit.

La puissance utilisable :

$$W = R i^2 = R \cdot \frac{V_{\infty}^2}{\left(R + \frac{V_{\infty}}{i_0}\right)^2} \quad (2)$$

présente un maximum pour une certaine valeur de R donnée par :

$$\frac{dW}{dR} = \frac{V_{\infty}^2}{\left(R + \frac{V_{\infty}}{i_0}\right)^3} \cdot \left(\frac{V_{\infty}}{i_0} - R\right) = 0$$

W sera maximum pour $R_0 = \frac{V_{\infty}}{i_0}$ (résistance optima) (3).

Pour cette valeur de R , $W = W_m = \frac{1}{4} \cdot i_0 \cdot V_{\infty}$ (4) et le courant débité vaudra $\frac{1}{2} i_0$ (5).

Ces résultats simples ne sont qu'approximatifs mais suffisants pour établir un avant-projet.

Il nous reste à connaître pour résoudre complètement le problème, les relations qui lient la force électro-motrice à vide V_{∞} et le courant de court-circuit i_0 à l'éclairement E de la photopile.

Plusieurs auteurs proposent différentes formules reliant l'éclairement à la force électro-motrice, certaines sont empiriques ou conduisent à des incompatibilités à la fois avec l'expérience et avec la théorie de la couche d'arrêt. Nous avons retenu celle que propose G. BLET [1] et qui est la suivante :

$$E = A \cdot \frac{V_{\infty}}{\left(1 - \frac{V_{\infty}}{V_0}\right)^4} \quad (6)$$

V_0 étant la d.d.p. limite qui correspond à la barrière de potentiel φ de la jonction et A une constante inversement proportionnelle à la résistance interne de la cellule à l'obscurité : $A = B/r$. La formule précédente correspond à un élément de surface unité. Quant au courant de court-circuit i_0 , il est proportionnel à l'éclairement, le facteur de proportionnalité dépendant de la photopile choisie.

$$i_0 = k \cdot E \quad (7) \quad \text{avec} \quad k = \frac{1}{A \cdot r}$$

Cette équation n'est valable que pour un éclairement maximum de l'ordre de 10 000 lux, au-delà la proportionnalité n'étant plus maintenue.

Entre les 2 formules (6) et (7), nous pouvons éliminer la constante A et nous obtenons la relation :

$$i_o \cdot r = \frac{V_\infty}{\left(1 - \frac{V_\infty}{V_o}\right)^4} \quad (8)$$

Les résultats expérimentaux montrent que la résistance interne r est inversement proportionnelle à la surface totale de la cellule, ceci n'étant valable en moyenne que pour un même constructeur, les techniques de fabrication des photopiles n'étant pas les mêmes.

Nous poserons :

$$r = \frac{\rho}{S'}$$

S' étant la surface totale de la photopile (en cm²) d'où la formule suivante :

$$\rho \cdot \frac{i_o}{S'} = \frac{V_\infty}{\left(1 - \frac{V_\infty}{V_o}\right)^4} \quad (9)$$

reliant le courant de court-circuit et la tension à vide obtenus pour un certain éclairement E.

Les résultats obtenus dans ce paragraphe vont nous permettre de déterminer le type de cellule et le dispositif amplificateur correspondant qui commanderont avec le maximum d'efficacité l'ensemble de l'appareil.

Le dispositif le plus simple que nous pouvons envisager pour la commande des moteurs à partir des cellules consiste en l'utilisation directe de relais aux bornes de ces cellules.

La source de lumière étant ici le Soleil, nous disposons d'une énergie lumineuse suffisamment intense pour éviter l'emploi d'un dispositif amplificateur intermédiaire.

Il existe à l'heure actuelle un grand choix de relais sensibles permettant de réaliser, avec le rendement maximum, la liaison directe par leur intermédiaire entre les cellules et les moteurs qu'elles commandent.

d) Détermination de l'ensemble cellule-relais.

Nous venons de voir précédemment qu'il existe pour chaque type de cellule une valeur de la puissance maximale utilisable qui dépend de l'éclairement. A cette puissance maximale Wm correspond une résistance de charge optima Ro. Il est donc nécessaire de déterminer au préalable, la valeur de l'éclairement E qui devra assurer l'enclenchement du relais.

A l'équilibre de l'appareil l'axe du système optique est dirigé vers le Soleil ; les quatre cellules dont les axes sont perpendiculaires à cette direction ne reçoivent donc pas la lumière solaire directe mais seulement la lumière diffusée par le ciel ou réfléchiée par le sol : l'éclairement reçu par chacune des cellules est alors de l'ordre de quelques milliers de lux. Lorsque l'axe optique est orienté d'une manière quelconque, l'une ou moins des cellules reçoit le rayonnement solaire direct et la valeur de l'éclairement peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de lux, l'énergie reçue étant proportionnelle à cos α, si α est l'angle d'incidence du faisceau de lumière. Il est à remarquer que le courant donné par la cellule est inférieur à sa valeur théorique et d'autant plus que α est plus grand, pour de la lumière naturelle : les écarts constatés dépendent de l'indice apparent de la couche multiple, les lois de Fresnel pour la réflexion vitreuse s'appliquant à celle-ci.

Les formules (3) et (9) du paragraphe précédent vont nous permettre de déterminer l'ensemble cellule-relais présentant la sensibilité optima pour obtenir la plus grande précision possible dans l'orientation de l'axe optique de l'appareil.

Soient :

$$\rho \cdot \frac{i_o}{S'} = \frac{V_\infty}{\left(1 - \frac{V_\infty}{V_o}\right)^4} \tag{9}$$

et $R_o = \frac{V_\infty}{i_o}$ (3) qui donne la valeur de la résistance optima correspondant au maximum de la puissance utilisable.

En remplaçant dans (9)' i_o par sa valeur tirée de l'équation (3), on obtient :

$$\frac{\rho}{R_o \cdot S'} = \frac{1}{\left(1 - \frac{V_\infty}{V_o}\right)^4}$$

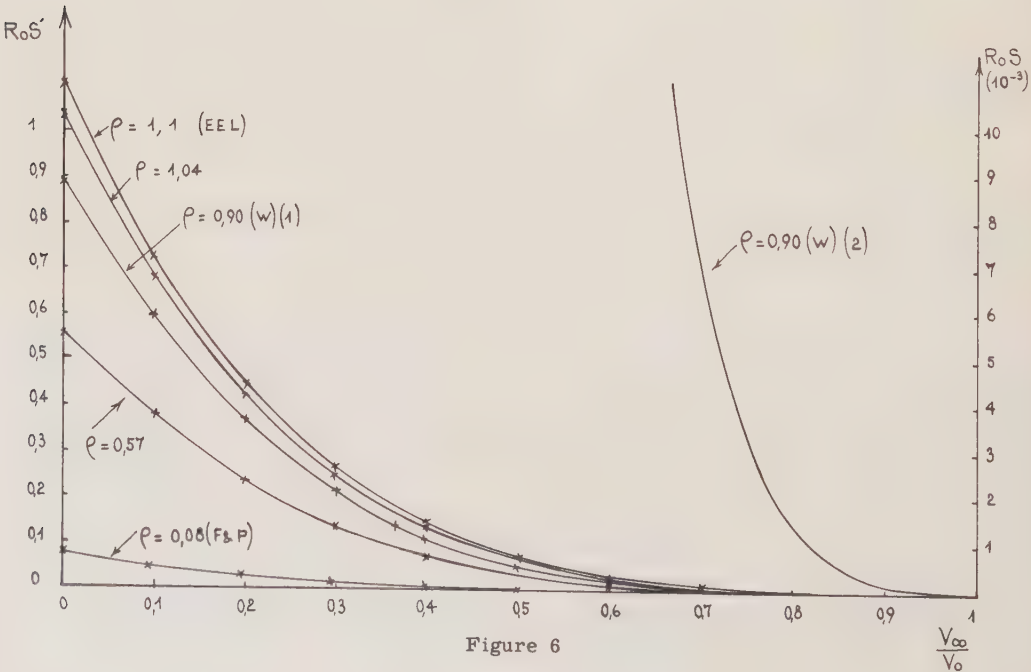
d'où :

$$R_o \cdot S' = \rho \cdot \left(1 - \frac{V_\infty}{V_o}\right)^4 \tag{10}$$

Nous avons vu que ρ était pratiquement constant pour toutes les cellules dont le procédé de fabrication est identique. Quelques valeurs de ρ sont données dans le tableau suivant [2].

Cellules	EEL anglaises	F et P allemandes	Westaphot françaises	Américaines	Mégatron anglaises
ρ moyen	1,1	0,08	0,90	1,04	0,57

ρ est ici exprimé en $M\Omega.cm^2$.



La figure 6 représente les variations du produit $R_o.S'$ en fonction du rapport $\frac{V_\infty}{V_o}$ pour les différentes valeurs de ρ du tableau précédent.

Nous avons choisi pour la réalisation de l'appareil des cellules "Westaphot" pour lesquelles $\rho = 0,9 \text{ M}\Omega.\text{cm}^2$; V_o le potentiel limite est sensiblement constant et peu influencé par l'origine et les dimensions de la cellule, sa valeur moyenne sera prise égale à 0,58 volts. Le potentiel en circuit ouvert V_∞ fonction de l'éclairement peut être représenté par une seule courbe valable pour toutes les cellules unitaires de la même origine, cette courbe est donnée par la figure 7, la figure 8 traduisant les variations de V_∞ en fonction de $\log E$.

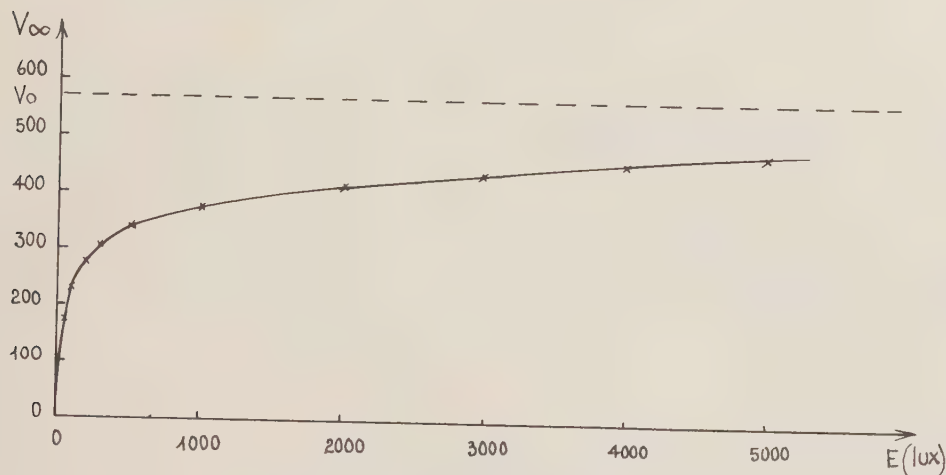


Figure 7

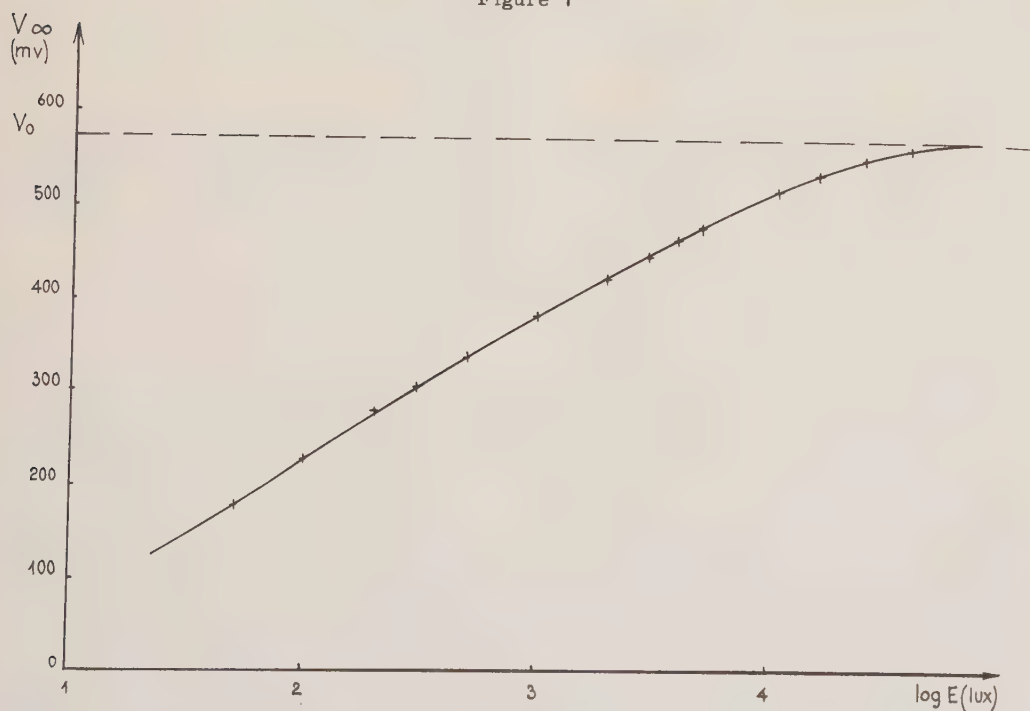


Figure 8

Ce graphique nous donne donc la valeur de V_∞ correspondant à l'éclairement minimum choisi pour obtenir l'enclenchement du relais correspondant : cette valeur est déterminée expérimentalement au moyen d'un luxmètre étaloné composé d'une photopile de grande dimension (Westaphot de diamètre

67 mm) et d'un microampèremètre à plusieurs sensibilités. Nous devons tenir compte ici du fait que l'incidence du faisceau de lumière parallèle qui tombe sur la cellule lors du fonctionnement du pointeur solaire est voisine de 90°. D'après la remarque faite au paragraphe (d), le courant donné par la cellule est inférieur à sa valeur théorique ; le tableau suivant indique les écarts relatifs $\frac{\Delta i}{i}$ en fonction de l'angle d'incidence α_0 .

α_0 (degrés)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$\Delta i/i$ (%)	0	0,5	1	2	3	5	7	15	45

D'autre part, il est nécessaire autant que possible d'assurer le fonctionnement du pointeur solaire depuis le lever jusqu'au coucher du Soleil. Les courbes des variations de l'éclairement données par un luxmètre enregistreur pour une surface horizontale montrent que cet éclairement varie très rapidement après le lever du Soleil, passant d'une centaine de lux, au moment du lever à 3 000 lux environ une demi-heure après. A ce moment la hauteur du Soleil est approximativement de 4 degrés au-dessus de l'horizon. Si nous choisissons cet instant pour le début de la mise en service de l'appareil, la courbe de la figure 7 détermine la valeur de V_∞ correspondant à 3 000 lux, c'est-à-dire 0,440 volt : V_0 le potentiel limite étant de 0,58 volts, le rapport $\frac{V_\infty}{V_0} = 0,76$, ce qui donne d'après la courbe (2) de la figure 6 le produit de la résistance optima par la surface de la cellule, soit :

$R_0 \cdot S' = 2,8 \cdot 10^{-3}$, R_0 étant exprimée en $M\Omega$ et S' en cm^2 .

Les cellules de type "Westaphot" existent sous différents modèles : rectangulaires (les dimensions étant comprises entre 11 × 18 mm pour la plus petite et 60 × 85 mm pour la plus grande) et rondes (le diamètre variant de 4 à 67 mm).

Pour des raisons pratiques de montage, nous rejeterons les cellules rondes ; parmi les cellules rectangulaires, nous devons choisir celles de faibles dimensions pour lesquelles la valeur de R_0 corresponde à un type de relais sensible de modèle courant. Si nous prenons la cellule de dimensions 11 × 18 mm (surface $S' = 1,98 \text{ cm}^2$), la valeur de R_0 sera :

$$R_0 = \frac{2,8 \cdot 10^{-3}}{S' \text{ cm}^2} \approx 1,4 \cdot 10^{-3} M\Omega = 1\,400 \Omega.$$

Or cette valeur de la résistance correspond à plusieurs types de relais galvanométriques de grande sensibilité parmi lesquels nous avons retenu le relais "Sensitact" type S dont la résistance du circuit de commande est de 1 500 Ω ; la sensibilité étant rendue variable grâce à deux contacts réglables, la déviation totale (90°) correspondant à un courant de 66 μA . La puissance contrôlée aux contacts de ce relais est nécessairement faible : 30 milliwatts sous une tension maximum de 10 volts ; aussi est-il nécessaire de lui associer un élément auxiliaire moins sensible mais de facteur de transmission élevé, par exemple un relais secondaire électromagnétique assurant directement la mise sous tension du moteur correspondant.

Ayant ainsi choisi les cellules et les relais qui leur sont associés, nous allons étudier la réalisation pratique des circuits assurant à partir de ces cellules la commande de la rotation des deux moteurs qui devront amener l'axe optique de l'appareil dans une direction assez voisine de celle du Soleil pour permettre au dispositif de réglage fin d'intervenir afin d'obtenir la coïncidence parfaite de cet axe avec la direction du Soleil.

3 - Réalisation pratique du dispositif d'approche.

Nous avons vu au paragraphe (1), la disposition à adopter pour les 4 cellules groupées en 2 couples (C_1, C'_1) et (C_2, C'_2) commandant respectivement les moteurs M_1 dont l'axe D_1 est dans le plan horizontal et M_2 d'axe D_2 vertical. Chacun de ces couples doit déterminer le sens de rotation du moteur correspondant de manière à obtenir l'égalité de l'éclairement pour chacune des cellules. A ce moment le relais doit se trouver en position de repos. Si l'axe optique présente un décalage par rapport à la direction du Soleil, dans chacun des couples, l'une des cellules (par exemple C_1), reçoit la lumière solaire directe et doit provoquer la déviation du relais dans un sens déterminé, la déviation ayant lieu dans l'autre sens pour la cellule C'_1 . La figure 9 montre la disposition adoptée pour la commande des relais à partir de (C_1, C'_1) ou (C_2, C'_2).

Le potentiomètre R_1 (1 K Ω environ) permet de compenser la différence de sensibilité pouvant exister entre les deux cellules et d'amener le relais à l'équilibre lorsque les cellules subissent le même éclairement : dans ce cas la différence de potentiel aux bornes de G_1 est nulle.

Une différence des éclairements engendre une d.d.p. positive ou négative suivant que C_1 est plus ou moins éclairée que C_2 ; le relais étant de type polarisé à zéro central, établit un contact entre l'armature mobile et l'un des deux contacts fixes. Pour obtenir à ce moment la mise sous tension du moteur

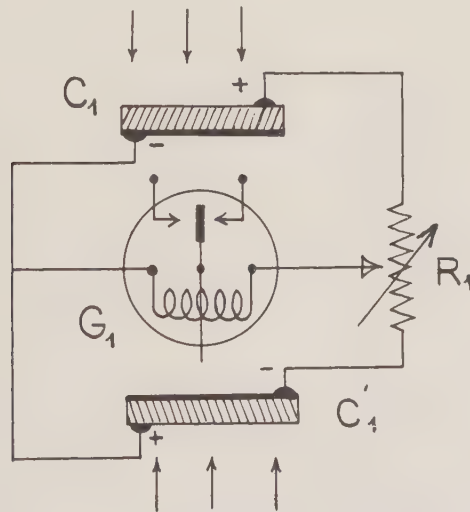


Figure 9

correspondant, il est nécessaire d'utiliser des relais auxiliaires car le pouvoir de coupure des relais galvanométriques est faible : 30 mW dans le cas présent sous une tension maximum de 10 volts. Ces relais de type électromagnétique sont parfaitement adaptés pour une telle commande, leur enclenchement ne nécessitant qu'une faible puissance (< 30 mW), par contre leurs contacts assurent un débit de 1 ampère environ sous la tension du secteur. La figure 10 représente le schéma de principe pour la commande des moteurs à partir des relais "Sensitact", ceci étant valable pour l'un ou l'autre des moteurs M_1 et M_2 .

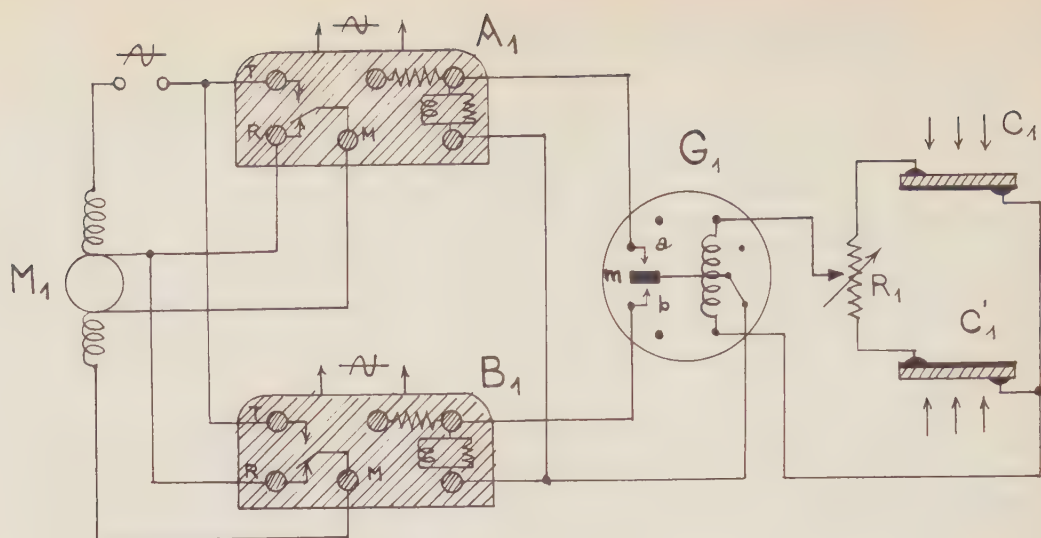


Figure 10

Lorsque l'une des deux cellules C_1 ou C'_1 est plus éclairée que l'autre, le relais G_1 établit le contact en a par exemple ce qui met le relais A_1 en position de travail, le relais B_1 restant au repos (les alimentations respectives des deux relais auxiliaires ne sont pas figurées ici). A ce moment le moteur M_1 du type universel a ses deux enroulements placés en série aux bornes du secteur et ceci dans un certain ordre ce qui détermine le sens de rotation. De même si le contact dans G_1 a lieu en b, A_1 reste au repos et B_1 est en position de travail : les deux enroulements sont à nouveau parcourus par le courant du secteur mais dans l'ordre contraire ; le sens de rotation est l'inverse du sens précédent. Au dispositif représenté par la figure 10 sont adjoints des éléments secondaires non figurés ici et permettant, soit de couper l'alimentation du moteur, soit de commander celui-ci indépendamment du relais au moyen d'interrupteurs et de commutateurs afin de réaliser les vérifications et contrôles nécessaires au bon fonctionnement de l'appareil.

Nous venons de voir dans ce paragraphe comment est réalisé le dispositif d'approche qui permet de placer l'axe optique du pointeur solaire dans une position voisine de la direction du Soleil. Or, d'après les conditions réalisées à l'équilibre : égalité de l'éclairement des cellules composant les couples (C_1 , C'_1) et (C_2 , C'_2) ceux-ci ne recevant plus que la lumière diffusée par le ciel et non la lumière solaire directe, il en résulte une imprécision quant à la détermination de cet équilibre d'autant plus qu'ainsi que nous l'avons précisé au paragraphe (d), la sensibilité des cellules pour une incidence voisine de 90° est fortement diminuée par suite des lois de la réflexion vitreuse. Il est donc nécessaire pour amener l'axe optique à être confondu avec la direction du Soleil de substituer au réglage d'approche lorsque celui-ci est à l'équilibre, un autre dispositif que nous appellerons réglage fin complétant le premier et n'intervenant que lorsque la première phase du réglage est terminée.

B - DISPOSITIF DE REGLAGE FIN -

Ce dispositif doit agir sur les deux moteurs M_1 et M_2 d'une manière analogue au dispositif d'approche. Les différences entre les deux dispositifs résidant dans le fait que le second doit réaliser l'équilibre avec le maximum de précision possible et seulement quand celui-ci est obtenu avec le réglage d'approche. Par analogie avec le premier, on peut envisager de le réaliser également avec des cellules à couche d'arrêt de mêmes dimensions, comman-

dant les moteurs par l'intermédiaire de relais galvanométriques sans aucun dispositif d'amplification. Ces cellules doivent être associées comme dans le cas précédent, formant ainsi deux couples (K_1, K'_1) et (K_2, K'_2) dont chacun commande le moteur M_1 pour (K_1, K'_1) et le moteur M_2 pour (K_2, K'_2) dans un sens ou dans l'autre suivant que l'une des cellules est plus ou moins éclairée que l'autre. Il suffit donc de déterminer la disposition géométrique de ces cellules et le procédé optique donnant à l'équilibre la direction exacte du Soleil.

Nous avons fixé au début de ce chapitre la position des 4 cellules nécessaires au dispositif d'approche : elles sont situées respectivement aux extrémités de deux diamètres perpendiculaires d'un cylindre d'axe $\overrightarrow{OS}$ (direction du Soleil), l'un des diamètres étant parallèle à l'axe D_1 du moteur M_1 . Pratiquement pour réaliser l'appareil ce cylindre est remplacé par un parallélépipède, les cellules étant disposées sur les 4 faces de celui-ci. Nous pouvons placer les quatre cellules (K_1, K'_1), (K_2, K'_2) dans un plan perpendiculaire à l'axe $\overrightarrow{OS}$ et dirigées vers le Soleil. A l'équilibre du système d'approche, elles recevront la lumière solaire sous une incidence voisine de la normale. On peut alors envisager plusieurs procédés optiques pour obtenir que les cellules ne puissent être également éclairées dans chaque couple que pour une incidence exactement normale. Voici tout d'abord celui que nous avons utilisé dans une première réalisation.

1 - Premier dispositif de réglage optique.

Les cellules (figure 11) étant disposées dans le plan P perpendiculaire à $\overrightarrow{OS}$ en ne laissant entre-elles qu'un intervalle suffisant pour en assurer l'isolement électrique, on interpose sur le trajet de la lumière solaire incidente un écran D opaque percé au centre d'un trou circulaire E : le faisceau de lumière parallèle provenant de E est intercepté par un écran E' de diamètre légèrement supérieur à celui de E. Si $\overrightarrow{OS}$ représente exactement la direction du Soleil aucune des cellules n'est éclairée directement par lui. Par contre, un faible déplacement de $\overrightarrow{OS}$ faisant dévier le faisceau incident provenant de E celui-ci n'est plus exactement arrêté par l'écran E' : une ou plusieurs des cellules K se trouveront ainsi éclairées directement par le Soleil, provoquant la déviation d'au moins un des deux relais associés à (K_1, K'_1) et (K_2, K'_2). Ces relais commanderont à leur tour par l'intermédiaire de relais auxiliaires la rotation des moteurs correspondants de manière à replacer l'axe $\overrightarrow{OS}$ dans la direction du Soleil.

La position des cellules K dans le plan P ne peut être quelconque : elle dépend de la position des axes de rotation des moteurs et de la disposition des couples de cellules (C) sur le pourtour du parallélépipède qui leur sert de support.

Nous avons vu au début de ce chapitre que l'axe définissant la position du couple de cellules (C_2, C'_2) est parallèle à l'axe D_1 du moteur M_1 . C'est la rotation de ce moteur qui amène les cellules (C_1, C'_1) à l'équilibre d'éclairement ; de même pour le réglage fin cette rotation doit amener également les cellules (K_1, K'_1) à l'équilibre soit par égalité d'éclairement si le couple correspondant (K_2, K'_2) n'est pas à l'équilibre soit à l'obscurité si l'équilibre de (K_2, K'_2) est réalisé : les meilleures conditions pour le réglage de l'équilibre seront réalisées lorsque la rotation autour de l'axe D_1 déterminera pour une variation angulaire donnée $\Delta\theta$ la plus grande variation possible de la différence d'éclairement des deux cellules K_1 et K'_1 . La figure 12 indique les positions respectives des groupes de cellules C et K réalisant cette condition.

K_1 et C_1 commandent la rotation du moteur M_1 dans le sens positif par exemple, K'_1 et C'_1 le même moteur mais dans le sens négatif ; de même pour K_2, C_2 et K'_2, C'_2 , pour le moteur M_2 .

Ayant vu la disposition choisie pour les cellules C et K, nous devons déterminer maintenant comment se fera le passage du réglage d'approche au ré-

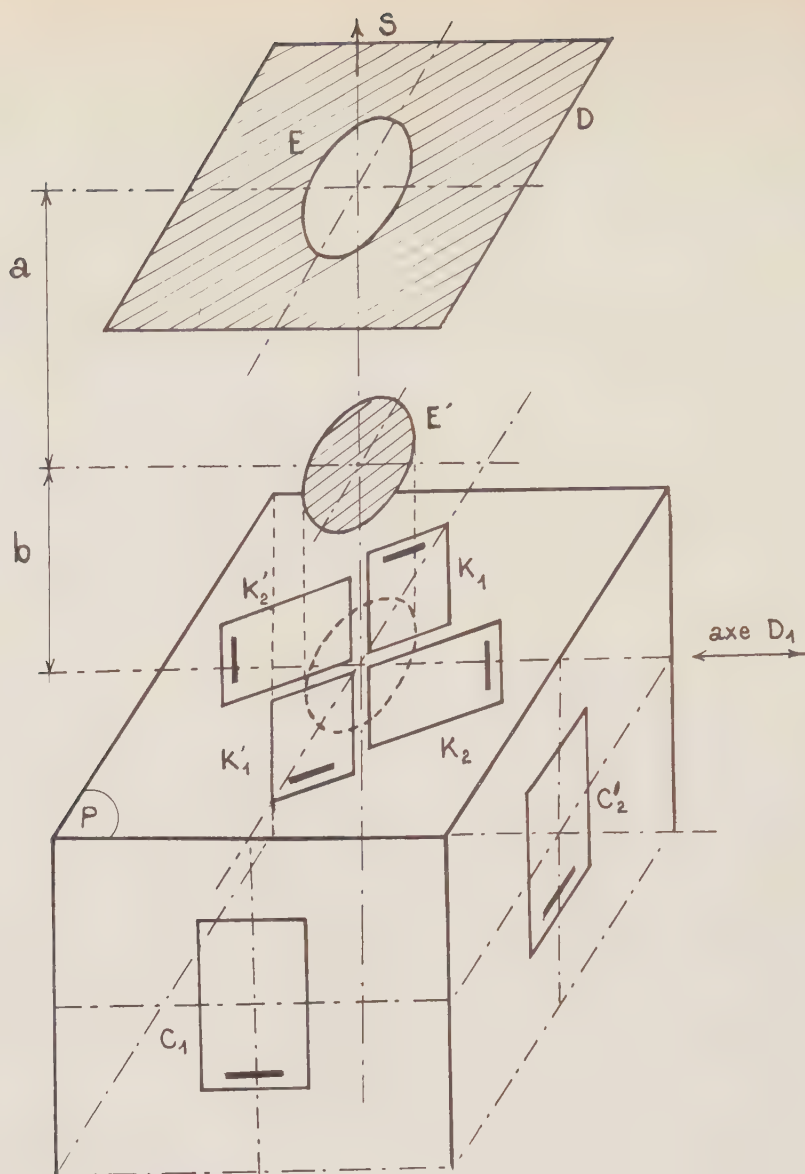


Figure 11

glage fin au point de vue optique de manière à éviter toutes possibilités d'interférence entre ces deux réglages.

Nous avons indiqué à la fin du paragraphe (A) les raisons de l'imprécision au point de vue géométrique du dispositif d'approche. Celui-ci orientera l'axe optique de l'appareil de manière à l'amener au voisinage de la direction du Soleil : cet axe doit donc se placer à l'intérieur d'un cône ayant pour axe la direction réelle du Soleil et dont l'ouverture caractérise l'erreur maximum due au dispositif d'approche lorsque son équilibre est réalisé. A ce moment pour mettre en jeu le réglage fin, les cellules K doivent être dans le champ du faisceau de lumière parallèle délimité par le trou E du disque D. L'expérience montre qu'en prenant comme ouverture maximum du cône 40° , l'erreur commise sur le réglage d'approche est toujours inférieure à cet angle. Connaissant les dimensions géométriques des cellules K (11×18 mm) on peut ainsi

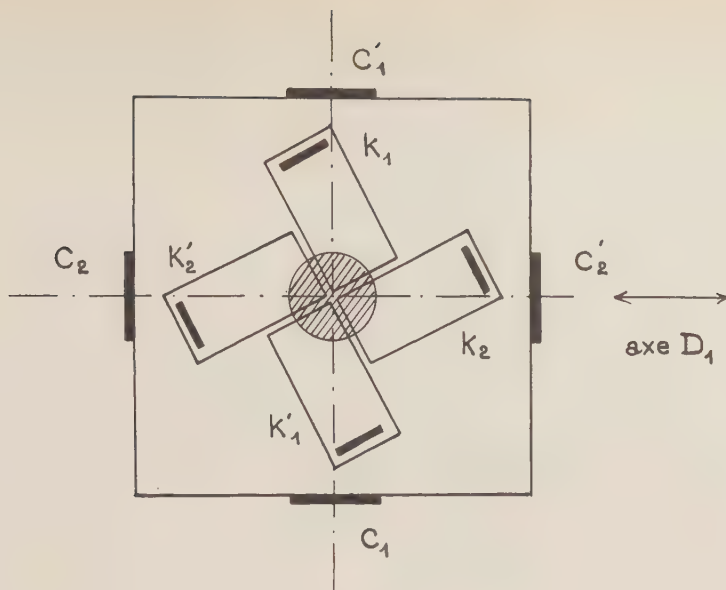


Figure 12

se fixer le rapport de la distance du trou E à l'écran E' à la distance de E' aux cellules, en fonction du diamètre de E. (figure 11).

En choisissant b le plus faible possible, c'est-à-dire en plaçant l'écran E' très près des cellules, on pourra prendre pour valeur de a : 65 mm en moyenne, le diamètre de E' étant de 18 mm.

Lorsque l'axe optique sera situé en dehors du cône défini précédemment les cellules K ne recevront plus que la lumière diffusée par le ciel : leur éclairement sera sensiblement le même et les relais qu'elles commandent resteront à l'équilibre puisque nous avons adopté pour ces cellules le même montage que pour le réglage d'approche. Ces relais n'interviendront donc qu'au moment où le réglage d'approche est terminé.

Pour caractériser ce dispositif optique, nous pouvons dès maintenant indiquer la précision obtenue par le pointeur solaire équipé de ce dispositif.

2 - Précision obtenue.

Cette précision dépend à la fois du procédé optique utilisé pour le réglage fin, de la sensibilité des cellules et du réglage des relais. Les contacts des relais sont ajustables et permettent d'obtenir un enclenchement de ceux-ci pour un courant minimum de l'ordre de 5 μ A de part et d'autre du zéro. Ce courant correspond pour les cellules utilisées à une augmentation de l'éclairement d'environ 500 lux. Or, pendant la période où a lieu le réglage fin, les cellules peuvent subir un éclairement élevé car elles reçoivent la lumière solaire directe. Cet éclairement d'environ 100 000 lux n'est reçu que par une partie de la surface de ces cellules, surface qui diminue au fur et à mesure que l'axe optique se rapproche de la direction du Soleil. Si nous admettons approximativement la proportionnalité du courant de cellule à la surface éclairée et ceci pour une même valeur de l'intensité lumineuse reçue, le seuil d'enclenchement des relais correspondra à l'éclairement de la 1/200 partie de la surface de la cellule : c'est le rapport de l'éclairement donné par le Soleil à l'éclairement correspondant au seuil de fonctionnement du relais.

Les cellules, de dimensions 11 x 18 mm, ont une surface de 198 mm². Donc l'éclairement par le Soleil de 1 mm² de la surface suffirait à déterminer l'enclenchement du relais.

Nous pouvons déterminer géométriquement quelle est la surface de la cellule qui reçoit la lumière solaire directe lorsque l'axe $\overrightarrow{OS}$ du dispositif optique fait avec la direction du Soleil un angle ε (figure 13).

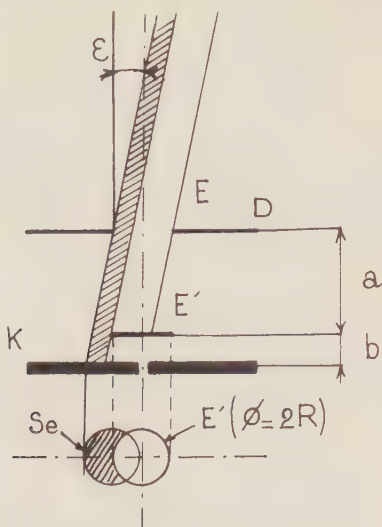


Figure 13

La surface éclairée est représentée par la fraction Se du faisceau de lumière parallèle issue de E (voir figure 11) non interceptée par l'écran E' . Cette surface est fonction du diamètre $2R$ de l'écran E' , de l'angle ε et du diamètre du trou E . Nous pouvons prendre le même diamètre pour E et E' ce qui est d'ailleurs une des conditions nécessaires pour réaliser la précision maximum du réglage. Le calcul donnera pour valeur de Se :

$$Se = R^2 (\pi - \theta + \sin \theta)$$

avec :

$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{c}{R} \quad \text{et} \quad c \neq \frac{a+b}{2} \cdot \tan \varepsilon = \frac{a+b}{2} \cdot \varepsilon$$

$a+b$ est en moyenne de 70 mm : distance des cellules au trou E . Si nous prenons :

$$\varepsilon = 1^\circ = \frac{\pi}{180},$$

on trouve :

$$c = \frac{1}{2} \times 70 \times \frac{\pi}{180} = \frac{7\pi}{36} = 0,612$$

$R = 8$ mm, donc :

$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{0,612}{8} = 0,0765 \quad \text{et} \quad \theta \neq 172^\circ$$

d'où :

$$Se = 64 \left(\pi - \frac{172\pi}{180} + 0,139 \right) = 64 \left(\frac{8\pi}{180} + 0,139 \right)$$

$$Se = 17,8 \text{ mm}^2.$$

L'angle ε étant petit, on peut admettre que la surface Se est proportion-

nelle à ϵ . Nous avons vu plus haut que l'éclairement par le Soleil de 1 mm^2 de la surface d'une cellule suffit à provoquer l'enclenchement du relais correspondant. Par conséquent un déplacement angulaire de l'axe $\vec{OS}$ de $4'$ par rapport à la direction exacte du Soleil représenterait l'erreur maximum comise sur la position de l'axe optique.

Ce dispositif de réglage très simple a permis d'effectuer les premiers essais de l'appareil afin de contrôler le fonctionnement correct des différents circuits et d'en effectuer les réglages. Par la suite, ayant jugé la précision obtenue insuffisante, nous lui avons substitué un nouveau dispositif moins simple, mais qui permet d'améliorer considérablement cette précision.

3 - Second dispositif ; précision du réglage.

Ce dispositif est composé essentiellement d'une lunette dont l'objectif L_1 dirigé vers le Soleil a une focale f_1 et l'oculaire L_2 , une focale f_2 (figure 14).

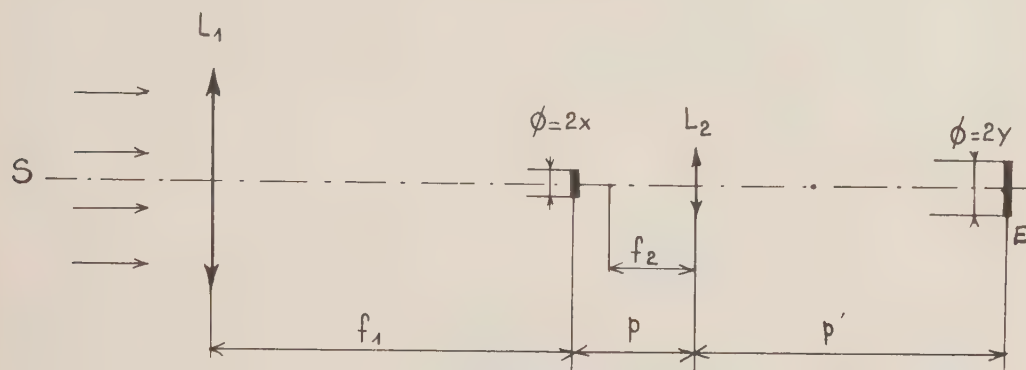


Figure 14

L_1 donne du Soleil une image réelle dans son plan focal dont le diamètre est $2x = f_1 \cdot \alpha$, α étant le diamètre apparent du Soleil ($\alpha = 32' = 0,0093$ radian). Cette image est formée à la distance p de l'oculaire L_2 ; p étant supérieur à f_2 , L_2 donnera à son tour une seconde image réelle du Soleil à la distance p' de l'oculaire. On dispose et on règle la lunette de manière à ce que cette dernière image soit formée sur l'écran E, placé devant les cellules K dont la disposition reste la même que précédemment, le diamètre $2y$ de cette image étant égal à celui de l'écran E. Les paramètres f_1 , f_2 , p , p' , $2x$ et $2y$ sont liés par plusieurs relations. Il est facile de déterminer dès maintenant quelle est l'augmentation de la précision que l'on obtient avec ce nouveau dispositif optique par comparaison avec l'ancien. Pour cela, il suffit de calculer le déplacement du faisceau de lumière intercepté par l'écran E pour une variation petite $\Delta\theta$ de la direction optique de l'appareil par rapport à la direction $\vec{OS}$ du Soleil.

Dans le premier cas (voir figure 13), ce déplacement sera $\Delta y = a \cdot \Delta\theta$ (1) a étant la distance séparant le trou E de l'écran E' ($a = 65 \text{ mm}$). $\Delta y = 65 \cdot \Delta\theta$.

Pour le second cas (figure 15), nous aurons :

$$\Delta x = f_1 \cdot \Delta\theta \quad \text{et} \quad \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{p'}{p}$$

d'où :

$$\Delta y = \frac{p'}{p} \cdot f_1 \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

Pour avoir la précision la plus grande, il est nécessaire de choisir un objectif de grande distance focale f_1 et de former l'image du Soleil donnée par cet objectif assez près du plan focal de l'oculaire L_2 . Dans le dispositif réa-

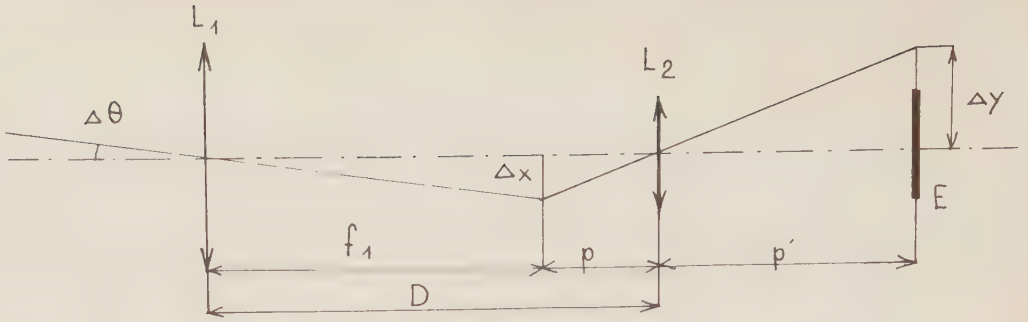


Figure 15

lisé, l'objectif choisi a une focale de 100 mm et l'oculaire une focale de 20 mm. Ces deux données permettent de calculer la distance $D = f_1 + p$ des deux lentilles et la distance de L_2 à l'écran E (p') en fonction du diamètre $2y$ de cet écran.

Nous avons :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f_2} \quad \text{et} \quad \frac{p'}{p} = \frac{2y}{2x} = \frac{2y}{f_1 \cdot \alpha}$$

(α : diamètre apparent du Soleil).

De ces deux équations, nous tirons :

$$\begin{cases} p' = \frac{f_2}{f_1 \cdot \alpha} (2y + f_1 \cdot \alpha) \\ p = \frac{f_2}{2y} (2y + f_1 \cdot \alpha) \end{cases}$$

et :

$$D = f_1 + p = f_1 + \frac{f_2}{2y} (2y + f_1 \cdot \alpha) = f_1 + f_2 + \frac{f_1 \cdot f_2 \cdot \alpha}{2y}$$

$$D = f_1 + f_2 + \frac{f_1 \cdot f_2 \cdot \alpha}{2y}$$

Nous avons choisi, dans ce cas, comme diamètre de E : $2y = 12$ mm,

$$f_1 = 100 \text{ mm}, f_2 = 20 \text{ mm}, \alpha = 32' = 0,0093 \text{ radian.}$$

d'où :

$$D = 121,55 \text{ mm}$$

et :

$$\begin{cases} p' = 278 \text{ mm} \\ p = 21,55 \text{ mm} \end{cases}$$

Le déplacement de l'image du Soleil sur l'écran E pour un déplacement angulaire $\Delta\theta$ de l'axe de la lunette sera d'après l'équation (2).

$$\Delta y = \frac{p'}{p} \cdot f_1 \cdot \Delta\theta = 1290 \cdot \Delta\theta \quad (\Delta y \text{ en mm}).$$

Si nous comparons avec la précision obtenue par le premier dispositif optique utilisé (équation 1), on constate qu'avec le second, elle est multipliée par $\frac{1290}{65} \approx 20$.

L'erreur maximum commise sur la position de l'axe optique de l'appareil est donc diminuée d'autant et ne sera plus que de $12''$ au lieu de $4'$.

La précision ainsi obtenue peut donc être considérée comme très suffisante : il est d'ailleurs à remarquer que dans le second dispositif on forme l'image réelle du Soleil sur l'écran E ce qui élimine la zone de pénombre existant dans le faisceau de lumière provenant du trou E', pour le premier dispositif ; la variation d'éclairement des cellules K est alors plus importante dans le 2ème cas quand l'axe optique fait un angle $\Delta\theta$ avec la direction du Soleil, ce qui contribue à améliorer la précision de l'appareil.

Toutefois, une remarque s'impose ici ; si nous augmentons d'un certain facteur la précision angulaire de la position de l'axe optique, nous diminuons de la même quantité le champ d'utilisation du réglage fin. Il est facile de le calculer connaissant les dimensions des cellules employées (figure 16).

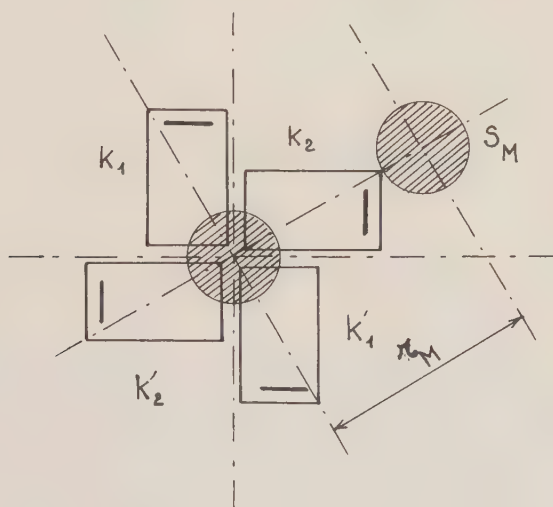


Figure 16

S_M représente la position extrême de l'image du Soleil sur les cellules K, position au-delà de laquelle le réglage fin ne peut plus intervenir, aucune des cellules ne pouvant être éclairée. La distance r_M du centre de cette image à l'axe optique de l'appareil est donnée par la diagonale des cellules augmentée du rayon de l'image.

$$r_M = \sqrt{11^2 + 18^2} + 6 = 27 \text{ mm.}$$

Nous avons déterminé plus haut, le déplacement Δy de l'image du Soleil en fonction de la variation $\Delta\theta$ de l'angle du dispositif optique par rapport à la direction réelle du Soleil :

$$\Delta y = \frac{p'}{p} \cdot f_1 \cdot \Delta\theta = 1290 \cdot \Delta\theta \quad (\Delta y \text{ en mm})$$

Ici $y = r_M = 27 \text{ mm}$ d'où :

$$\Delta\theta = \frac{27}{1290} \text{ radian } \approx 1^\circ.$$

Il est donc nécessaire que le dispositif de réglage d'approche puisse placer, lorsque son équilibre est réalisé, l'axe optique à l'intérieur d'un cône d'ouverture 2° .

4 - Modification du dispositif d'approche.

Avec le premier procédé employé pour le réglage fin l'erreur maximum du dispositif d'approche pouvait être environ 20 fois plus grande. Ce chiffre représente d'ailleurs le rapport des précisions angulaires des deux dispositifs optiques.

Pour améliorer la précision du dispositif d'approche, on a choisi la solution suivante : chacune des cellules C commandant ce dispositif est surmontée d'une calotte sphérique A; par exemple une lentille plan convexe à forte courbure dont la partie convexe dépolie est surmontée d'un petit prisme à réflexion totale P (figure 17).

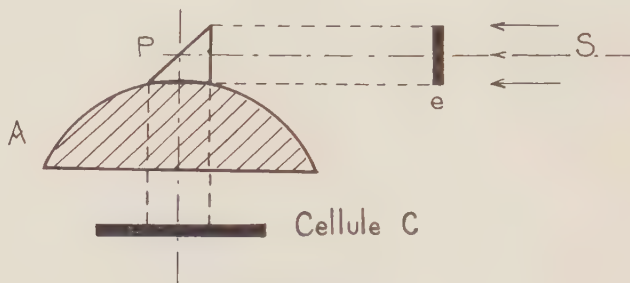


Figure 17

La surface de contact de A et de P ainsi que la face plane de la lentille restent polies.

La face courbe de A jouant le rôle de diffuseur, au voisinage de l'équilibre du dispositif d'approche, les cellules C subissent un éclairage supérieur à celui existant en l'absence de ce diffuseur ce qui permet d'obtenir une augmentation de la sensibilité du dispositif. D'autre part, des écrans e sont disposés à une certaine distance des prismes à réflexion totale P de manière qu'à l'équilibre, ils interceptent exactement le rayonnement solaire direct réfléchi par ces prismes sur les cellules C. Un déplacement de l'axe optique de l'appareil provoque une augmentation importante de l'éclairement de l'une au moins de ces cellules, ce qui a pour conséquence de réduire la zone d'imprécision du réglage d'approche et par suite de diminuer l'ouverture du cône correspondant à l'équilibre de ce réglage.

Si l'écran e est placé à 10 cm du prisme P d'arête 1 cm, une variation angulaire de 1° déterminera sur la cellule une zone éclairée de $17,5 \text{ mm}^2$ soit près de 9 % de la surface totale de cette cellule ce qui est largement suffisant pour assurer l'enclenchement du relais galvanométrique correspondant. Il est donc possible d'obtenir à l'aide du dispositif d'approche une erreur inférieure à 1 degré dans la direction de l'axe optique et par conséquent de permettre la mise en service du dispositif de réglage fin, le champ d'utilisation de celui-ci étant représenté par un cône d'ouverture 2 degrés.

Pour terminer l'étude du dispositif de réglage fin, il nous reste à établir la liaison électrique entre les relais affectés aux cellules K et les deux moteurs M_1 et M_2 et à prévoir les circuits auxiliaires nécessaires au fonctionnement correct de l'appareil.

5 - Commande des moteurs et circuits auxiliaires.

Nous avons vu que le montage des cellules K est identique à celui des cellules C. Le même schéma de commande des moteurs M_1 et M_2 par les

relais G, peut-être employé pour les relais F (réglage fin). Il est possible d'utiliser les mêmes relais auxiliaires pour les deux réglages ce qui revient à monter les relais F et G en parallèle sur le circuit de commande des relais auxiliaires. Il faudra simplement éviter qu'un déséquilibre accidentel (lumière parasite par exemple) des cellules C au moment où a lieu le réglage fin vienne, en agissant sur l'un des relais auxiliaires, provoquer soit l'arrêt du moteur correspondant, soit la mise en court-circuit d'un de ses enroulements. Pour cela nous allons utiliser le courant de fermeture des relais F à l'enclenchement du relais auxiliaire correspondant pour agir sur un relais C (C_1 pour le circuit du moteur M_1 , C_2 pour le moteur M_2) et le placer en position travail (figure 18). Ce contact travail fermera à son tour le circuit de commande d'un second relais D (D_1 pour M_1 , D_2 pour M_2). Celui-ci venant en position travail isole le relais G, donc met hors circuit le réglage d'approche et ceci pendant le temps nécessaire au réglage fin. Ainsi sera évité toute interférence entre les deux réglages jusqu'au moment où l'équilibre définitif est réalisé. A ce moment les relais F seront revenus au repos remettant ainsi en circuit les relais G. Il faut à nouveau éviter la mise en service du réglage d'approche et ne permettre qu'aux cellules K la commande des moteurs de manière à diriger constamment l'axe $\overline{OS}$ vers le Soleil si non l'on risque de provoquer l'amorçage d'oscillations (pendulage) par le passage continu d'un dispositif de réglage à l'autre. Pour cela, nous utiliserons une cellule supplémentaire (Cs) qui n'est éclairée directement par le Soleil que lorsque l'équilibre définitif est obtenu. Cette cellule maintient pendant la durée de cet équilibre un relais (E) en position travail. Ce relais de type inverseur bi-polaire, est intercalé sur le secondaire des relais G mettant ceux-ci hors circuit pendant toute la durée du temps où a lieu l'équilibre de l'ensemble des réglages. Nous avons choisi comme cellule une photodiode au germanium dont les faibles dimensions se prêtent très bien à la réalisation envisagée ; elle sera enfermée dans un cylindre pourvu à son extrémité d'un diaphragme de telle sorte qu'elle ne puisse recevoir directement la lumière solaire que lorsque l'équilibre de l'appareil est obtenu. Cette cellule est reliée au bobinage du relais électromagnétique (E) par l'intermédiaire d'une pile dont la tension maximum est de 30 volts. Sa grande sensibilité ($> 5 \mu A/100 \text{ Lux}$) autorise un choix assez facile du relais ; la puissance maximum dissipée dans la photodiode ne devant pas dépasser 30 mwatts, il suffira d'utiliser un relais dont le seuil d'enclenchement soit inférieur à cette valeur, par exemple de l'ordre de 10 mWatts. Une seule précaution sera nécessaire : limiter l'éclairement de la photodiode par le Soleil au moyen d'un filtre absorbant par exemple, de manière à ne pas dépasser la puissance maximum de 30 m W sous peine de provoquer rapidement la détérioration de la cellule par élévation de sa température, celle-ci devant toujours rester inférieure à 45°C.

Reprenons la description faite plus haut du dispositif auxiliaire servant à isoler les relais G pendant la mise en service du réglage fin : à cet effet nous avons utilisé un premier relais C dont l'enclenchement provoque à son tour celui du relais D. Il est possible grâce au contact repos de C (figure 18) de court-circuiter pendant la période où a lieu seulement le réglage d'approche (C est au repos) une résistance en série avec le moteur M (r_1 pour M_1 , r_2 pour M_2).

L'enclenchement de C qui correspond à la phase du réglage fin met en service cette résistance r ce qui provoque par la chute de tension dans r une diminution de la vitesse de rotation du moteur M. Cette diminution de la vitesse de rotation est indispensable pendant le réglage fin afin de supprimer le pendulage résultant des constantes de temps provenant du temps de réponse des relais et de l'inertie des moteurs. Le déplacement angulaire de l'axe optique doit être suffisamment lent pour éviter de dépasser la position d'équilibre. Par contre, la période de réglage d'approche doit être aussi courte que possible ; son point d'équilibre étant affecté d'une certaine indétermination évaluée au paragraphe précédent il n'y a pas à craindre dans ce cas la création d'oscillations autour de cette position. Nous remarquerons également sur la figure 18

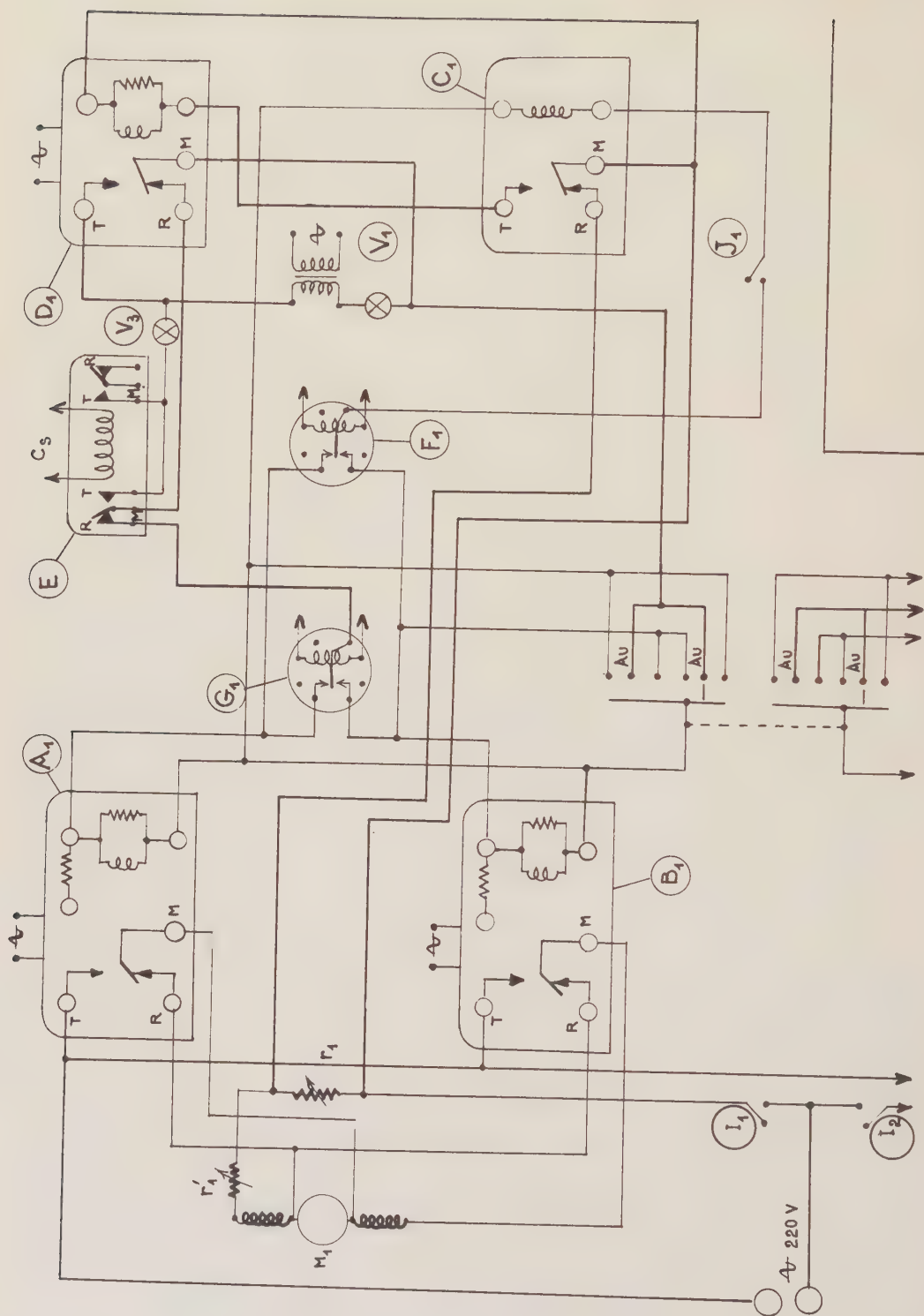


Figure 18

la présence d'un voyant lumineux V_1 mis en service quand le relais D_1 est sur la position travail ce qui correspond à la phase de réglage fin. De même un voyant V_2 servira d'indicateur de réglage fin pour le moteur M_2 . Enfin, un troisième, V_3 , alimenté par l'intermédiaire du relais E indiquera le moment de l'équilibre définitif de l'appareil. Ces trois voyants permettent de contrôler à chaque instant l'état de marche de l'appareil : si l'axe optique $\overline{OS}$ est très éloigné de la direction du Soleil aucun des deux équilibres n'est réalisé, les voyants V_1 , V_2 , V_3 sont éteints. Le réglage d'approche étant terminé V_1 et V_2 s'allument puis s'éteignent quand le réglage fin est terminé. A ce moment V_3 est mis en service jusqu'au moment où les cellules K en déséquilibre par suite du déplacement apparent du Soleil agissent sur l'un au moins des moteurs M.

Un commutateur à 6 positions et deux circuits indépendants est intercalé dans le circuit de commande des relais auxiliaires A_1 et B_1 d'une part, A_2 et B_2 d'autre part. Il permet en isolant les relais F et G la mise en marche des moteurs M de manière à amener l'axe optique dans une direction déterminée, afin de pouvoir contrôler le fonctionnement général de l'appareil.

La réalisation que nous venons de décrire convient parfaitement dans le cas où l'on utilise pour le réglage fin du pointeur solaire le premier dispositif optique indiqué au début du paragraphe B. Dans ce cas, le ralentissement de la vitesse des moteurs obtenu en plaçant une résistance r en série avec eux est suffisant pour éviter le pendulage de l'appareil autour de la position d'équilibre. Il n'en est plus de même avec le second dispositif dont la précision angulaire est 20 fois plus grande que dans le cas du premier : le rapport des vitesses de rotation pour le réglage d'approche et pour le réglage fin devient trop important pour qu'une résistance placée en série suffise à l'obtenir ; la diminution du couple fourni par les moteurs serait incompatible avec un fonctionnement normal de l'appareil. Toutefois, pour éviter le pendulage sans trop diminuer la tension de fonctionnement des moteurs, on a adjoint à l'appareil un dispositif qui, agissant sur les relais de réglage fin au moyen d'impulsions, coupe l'alimentation des moteurs pendant la durée de ces impulsions, lorsque l'équilibre est presque réalisé. La vitesse de rotation ne peut alors atteindre son maximum par suite de l'inertie mécanique de l'ensemble de l'appareil et par conséquent en donnant à la durée et à l'amplitude des impulsions des valeurs convenables, on peut facilement éliminer le pendulage à l'équilibre.

6 - Générateur d'impulsions.

Son principe est basé sur l'utilisation des oscillations de relaxation obtenues par la décharge d'un condensateur dans une lampe à néon (figure 19).

Ce condensateur de capacité $1 \mu F$ est chargé par une pile de 90 volts à travers une résistance fixe de $800 K\Omega$ et une résistance variable de $2 M\Omega$ maximum. Lorsque la tension aux bornes de la lampe à néon atteint la tension d'illumination, le condensateur se décharge rapidement dans le circuit comprenant la lampe à néon et une résistance de $10 K\Omega$. La forme des impulsions aux bornes de cette résistance est donnée par la figure suivante (figure 20).

L'amplitude maximum est de 500 mV pour une durée moyenne inférieure à 25 ms. La période de répétition de ces impulsions est rendue variable au moyen de la résistance de $2 M\Omega$: elle a été choisie aux environs de 1 seconde, sa valeur minimum étant d'une demi-seconde et son maximum de 2 secondes. Pour leur permettre d'agir avec efficacité sur les relais galvanométriques F_1 et F_2 , on est obligé d'augmenter la durée de ces impulsions ainsi que leur amplitude. Pour cela on les amplifie au moyen d'un transistor type 2 N 43, alimenté par une pile de 30 volts. De ce fait non seulement l'amplitude est augmentée mais la forme de l'impulsion est modifiée : on obtient pratiquement des signaux carrés dont la durée est de 50 ms avec une amplitude maximum de 1 volt, la fréquence de répétition restant la même (figure 21).

Un potentiomètre de $50 K\Omega$ permet de régler à sa valeur convenable

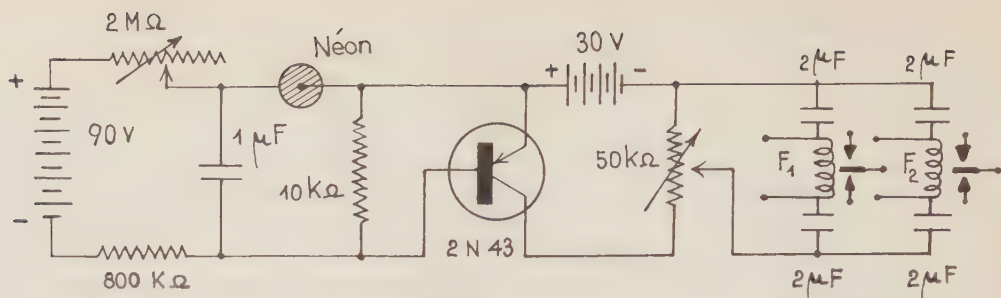


Figure 19

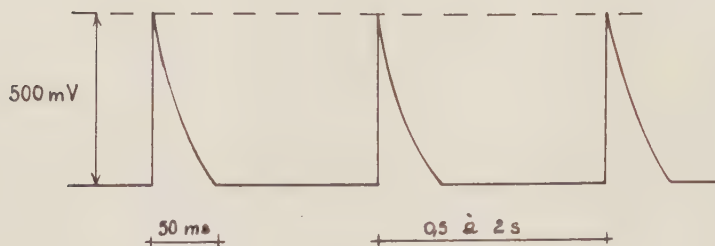


Figure 20

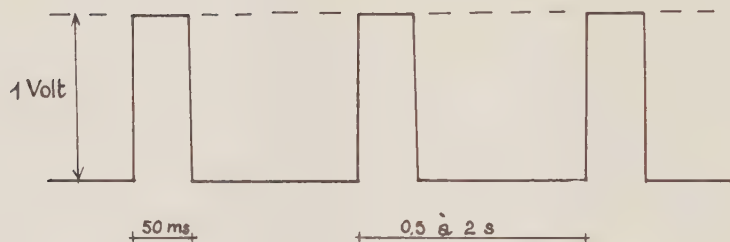


Figure 21

l'oscillation produite dans les relais par les impulsions, celles-ci leur étant appliquées à travers deux capacités de $2 \mu F$ de manière à ne pas envoyer dans les bobinages de ces relais une composante de courant continu qui en modifierait le zéro et par suite le réglage de l'équilibre de l'appareil.

Il nous reste à montrer comment ces impulsions agissent sur les relais de réglage fin et par suite sur les moteurs.

Lorsque le réglage d'approche est terminé, au moment où le réglage fin entre en jeu, le déséquilibre d'éclairement des couples de cellules K est maximum, de même pour le courant résultant. A ce moment, on règle le niveau des impulsions de manière à ce que les oscillations résultantes dans les relais soient inférieures à la déviation du courant des cellules : la rotation des moteurs est alors continue jusqu'au moment où approchant de la position d'équilibre la différence d'éclairement des cellules et par suite leur courant devient suffisamment faible pour que les impulsions provoquent à intervalles réguliers le déclenchement des relais et l'arrêt des moteurs. La durée de ces arrêts sera d'ailleurs d'autant plus grande que l'on approche de l'équilibre optique.

Une seule précaution est à prendre : éviter qu'à l'équilibre les impulsions ne puissent enclencher périodiquement les relais galvanométriques. Il suffit de réduire leur amplitude en agissant sur le potentiomètre de $50 K \Omega$.

On pourra donc ainsi supprimer le pendulage autour de la position d'équilibre sans augmenter le temps nécessaire pour obtenir cet équilibre à partir d'une position quelconque de l'appareil, le dispositif que nous venons de décrire n'agissant qu'en fin de réglage.

Pour terminer, nous pouvons résumer maintenant le déroulement des opérations successives qui, depuis une position quelconque, amèneront l'appareil à l'équilibre, c'est-à-dire, jusqu'à l'instant où l'axe $\overrightarrow{OS}$ se trouvera dirigé exactement vers le Soleil.

Ici, aucune précaution spéciale n'est à prendre au moment de la mise en station, il suffit que l'ensemble soit stable et ne puisse se déplacer par exemple sous l'action du vent ; l'étanchéité à la pluie a également été réalisée aussi bien pour le dispositif optique et la partie électrique que pour la partie mécanique. L'appareil est relié au secteur, les différents interrupteurs et commutateurs étant placés dans la position correspondant à la marche automatique. A ce moment, les moteurs M_1 et M_2 se mettent à tourner entraînant ainsi le dispositif optique, celui-ci solidaire de l'axe de M_1 (axe horizontal) ayant été au préalable convenablement orienté par rapport à D_1 .

Dès que l'axe $\overrightarrow{OS}$ du dispositif optique entre à l'intérieur du cône qui délimite la région où s'effectue le réglage fin, les cellules relatives à ce réglage interviennent interrompant la liaison des cellules d'approche aux moteurs. La vitesse de rotation de ces moteurs diminue par suite de la mise en service des résistances r_1 et r_2 et devient discontinue au voisinage immédiat de l'équilibre grâce au générateur d'impulsions. Les voyants V_1 et V_2 s'allument jusqu'au moment où toutes les cellules du réglage fin étant deux à deux à l'équilibre l'axe $\overrightarrow{OS}$ se trouve exactement dans la direction du Soleil, alors les voyants V_1 et V_2 s'éteignent. A ce moment la photodiode Cs recevant la lumière solaire directe maintient les relais G hors-circuit, seuls les relais F pouvant intervenir pour corriger le réglage par suite du déplacement apparent du Soleil. Le troisième voyant V_3 s'allume indiquant que l'équilibre de l'appareil est atteint et ceci jusqu'au moment où à nouveau le réglage fin intervenant l'un au moins des voyants V_1 et V_2 s'allume. Si des nuages masquent le Soleil pendant la période de réglage, l'appareil reste au repos, les cellules n'étant plus suffisamment éclairées ; s'il ne s'agit que d'un voile nuageux assez faible, le réglage d'approche peut continuer à jouer maintenant ainsi le dispositif optique dans une direction voisine de celle du Soleil. Par contre, si l'équilibre complet est atteint pour l'ensemble des réglages, la diminution de l'intensité de la lumière par apparition d'un nuage provoque seulement la mise en circuit du réglage d'approche, le relai E alimenté par la photodiode Cs revenant à sa position repos.

Il nous reste pour terminer ce chapitre à présenter l'ensemble de l'appareil tel qu'il a été réalisé au Laboratoire de Physique de l'Atmosphère.

C - REALISATION DE L'ENSEMBLE DE L'APPAREIL -

Une photographie (figure 22) représente les différents éléments composant cet ensemble, les carters et panneaux protecteurs ayant été enlevés.

Nous y distinguons :

1) Un châssis supporté par une platine et comportant sur le dessus les différents relais, les circuits de liaison étant groupés à l'intérieur de ce châssis.

2) Les 4 relais galvanométriques "Sensitact".

3) Les 4 relais auxiliaires de commande des moteurs.

4) Le moteur M_1 .

5) Le moteur M_2 .

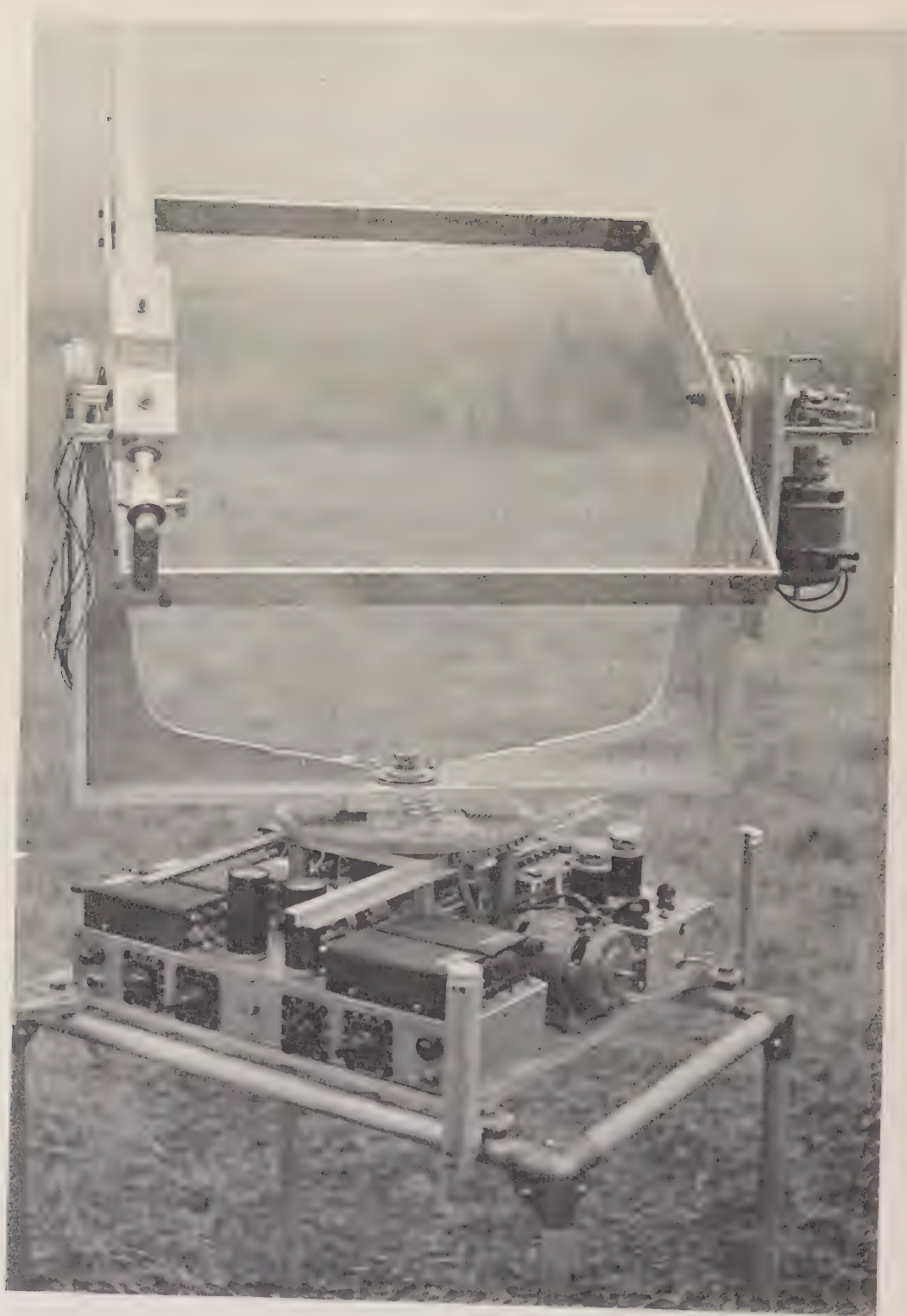


Figure 22

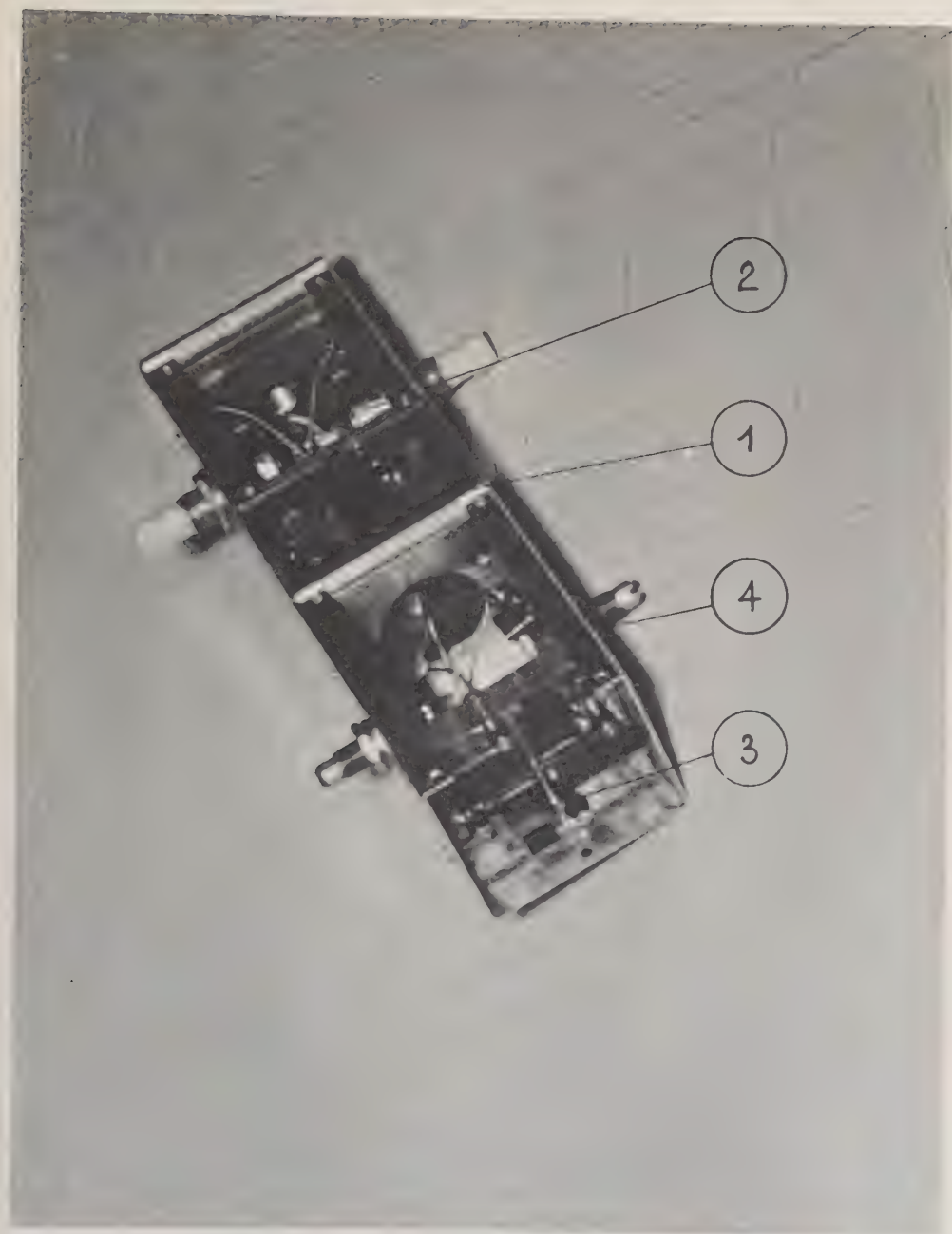


Figure 23



Figure 24

6) L'étrier inférieur commandé par le moteur M_2 (axe vertical).

7) Le cadre supérieur commandé par le moteur M_1 (axe horizontal) destiné à supporter un appareil de mesures.

8) Les pistes assurant la liaison électrique entre les moteurs, les cellules et le châssis.

9) Le dispositif optique porte cellules, orientable grâce à une rotule et solidaire de l'étrier supérieur, autrement dit de l'appareil de mesures fixé sur cet étrier.

La photographie suivante (figure 23) montre le dispositif optique ouvert faisant apparaître :

en (1) les 4 cellules de réglage d'approche avec les deux potentiomètres (2) d'équilibrage ; en (3) les 4 cellules de réglage fin et leurs potentiomètres (4).

Enfin, une troisième photographie (figure 24) présente l'ensemble sur son support les panneaux protecteurs remis en place.

CHAPITRE II

HÉLIOSTAT

Nous venons d'exposer au chapitre I la réalisation d'un pointeur solaire, c'est-à-dire un appareil possédant un système optique pourvu de cellules et matérialisé par son axe $\overrightarrow{OS}$, cet axe étant astreint à se diriger le plus exactement possible vers le Soleil. Ce pointeur solaire est destiné à supporter un appareil de mesure (par exemple un monochromateur) qui se déplacera en même temps que le dispositif optique. Cela nécessite la construction d'un appareil de dimensions importantes dont les divers éléments mécaniques seront capables de supporter des efforts non négligeables, en particulier les butées et les axes de rotation. Pour remédier à ces inconvénients, il doit être possible de transformer ce pointeur solaire en héliostat, c'est-à-dire de relier le mouvement de l'axe optique $\overrightarrow{OS}$ au déplacement d'un miroir de telle sorte que le rayon réfléchi par ce miroir ait une direction fixe dans l'espace quelle que soit la position du Soleil. Dans la première partie de ce chapitre nous allons étudier le mouvement relatif du miroir et du dispositif optique dans le cas général où les axes de référence sont quelconques puis nous examinerons des cas particuliers correspondant à des positions privilégiées de ces axes.

A - ETUDE THEORIQUE DU MOUVEMENT RELATIF. CAS GENERAL -

Soient les axes Ox , Oy et Oz ; $\overrightarrow{OS}$ un vecteur unité dirigé vers le Soleil représentant l'axe du dispositif optique. Le rayon réfléchi par le miroir dont nous supposons le centre au point O sera représenté par le vecteur unité $\overrightarrow{OR}$. Pour simplifier le problème nous pourrions, sans nuire à sa généralité, confondre la direction de $\overrightarrow{OR}$ avec l'axe Oy . La position du miroir est définie par la direction de sa normale au centre O c'est-à-dire par le vecteur unité $\overrightarrow{OH}$ qui est la bissectrice de l'angle formé par $\overrightarrow{OS}$ et $\overrightarrow{OR}$ (figure 25).

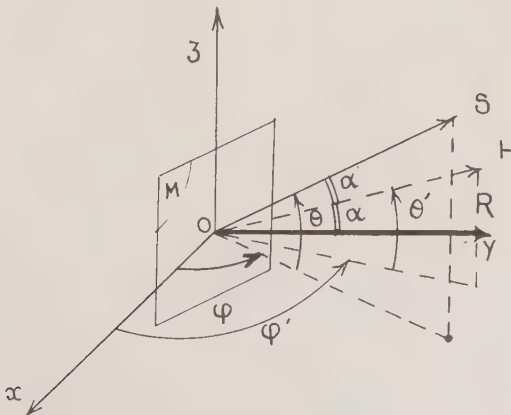


Figure 25

La position de l'axe optique sera définie par ses coordonnées polaires :

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta \cos \varphi \\ y = \rho \cos \theta \sin \varphi \\ z = \rho \sin \theta \end{cases}$$

les coordonnées du point S étant :

$$\begin{aligned} x_s &= \cos \theta \cos \varphi \\ y_s &= \cos \theta \sin \varphi \quad (\rho = 1) \\ z_s &= \sin \theta \end{aligned}$$

Les angles θ et φ sont ici des fonctions du temps dépendant du déplacement apparent du Soleil. Pour définir la position du miroir par rapport à $\overrightarrow{OS}$ nous allons déterminer les coordonnées de H en fonction de θ et φ .

Exprimons tout d'abord que $\overrightarrow{OH}$ est dans le plan formé par le rayon incident et le rayon réfléchi, c'est-à-dire $\overrightarrow{OS}$ et $\overrightarrow{OR}$. Ceci revient à écrire que le produit mixte des 3 vecteurs $\overrightarrow{OH}$, $\overrightarrow{OS}$ et $\overrightarrow{OR}$ est nul.

$$\overrightarrow{OH} \cdot (\overrightarrow{OS} \wedge \overrightarrow{OR}) = 0.$$

Si $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ sont les vecteurs unités des axes Ox, Oy, Oz :

$$\overrightarrow{OS} \wedge \overrightarrow{OR} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ X & Y & Z \\ A & B & C \end{vmatrix}$$

où X, Y, Z sont les coordonnées de S,

et A, B, C les coordonnées de R.

$$\overrightarrow{OS} \wedge \overrightarrow{OR} = (YC - ZB) \vec{i} + (ZA - XC) \vec{j} + (XB - YA) \vec{k}$$

et le produit mixte $\overrightarrow{OH} \cdot (\overrightarrow{OS} \wedge \overrightarrow{OR})$ devient :

$$\overrightarrow{OH} \cdot (\overrightarrow{OS} \wedge \overrightarrow{OR}) = x.(YC - ZB) + y.(ZA - XC) + z.(XB - YA) = 0 \quad (1)$$

x, y, z étant les coordonnées de H.

Mais $\overrightarrow{OH}$ est également bissectrice de l'angle formé par $\overrightarrow{OR}$ et $\overrightarrow{OS}$ ce qui se traduit par l'égalité des produits scalaires.

$\overrightarrow{OS} \cdot \overrightarrow{OH} = \overrightarrow{OR} \cdot \overrightarrow{OH}$, le module de chacun de ces vecteurs étant égal à l'unité

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OS} &= X \vec{i} + Y \vec{j} + Z \vec{k} \\ \overrightarrow{OR} &= A \vec{i} + B \vec{j} + C \vec{k} \\ \overrightarrow{OH} &= x \vec{i} + y \vec{j} + z \vec{k} \end{aligned}$$

d'où :

$$\overrightarrow{OS} \cdot \overrightarrow{OH} = xX + yY + zZ = \overrightarrow{OR} \cdot \overrightarrow{OH} = xA + yB + zC \quad (2)$$

Ayant choisi comme direction du rayon réfléchi $\overrightarrow{OR}$, l'axe Oy, les coordonnées de R se réduisent à :

$$A = 0, \quad B = 1, \quad C = 0.$$

D'autre part X, Y, Z étant les coordonnées de S, nous aurons :

$$X = x_s = \cos \theta \cos \varphi$$

$$Y = y_s = \cos \theta \sin \varphi$$

$$Z = z_s = \sin \theta$$

et l'équation (1) devient :

$$- Zx + Xz = 0 \quad \text{ou} \quad z \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi - x \cdot \sin \theta = 0 \quad (3)$$

ainsi que (2) :

$$Xx + Yy + Zz = y \quad (4)$$

Les équations (3) et (4) représentent la droite normale au miroir. Elles peuvent se définir également en coordonnées polaires.

$$\begin{cases} x = \cos \theta' \cdot \cos \varphi' \\ y = \cos \theta' \cdot \sin \varphi' \\ z = \sin \theta' \end{cases}$$

θ' et φ' étant des fonctions de θ et φ que nous allons déterminer. De (3) on déduit :

$$\frac{z}{x} = \frac{Z}{X} = \frac{\operatorname{tg} \theta'}{\cos \varphi'} = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\cos \varphi} \quad \text{ou} \quad \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \theta'} = \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'} \quad (5)$$

De (4) :

$$X \cos \varphi' + Y \sin \varphi' + Z \operatorname{tg} \theta' = \sin \varphi'$$

comme $\operatorname{tg} \theta' = \cos \varphi' \cdot \frac{Z}{X}$ on obtient :

$$X \cos \varphi' + Y \sin \varphi' + \frac{Z^2}{X} \cdot \cos \varphi' = \sin \varphi'$$

c'est-à-dire :

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{X^2 + Z^2}{X(1-Y)} \quad (6)$$

$$X^2 + Z^2 = \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \cos^2 \varphi = 1 - \cos^2 \theta \sin^2 \varphi$$

et :

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{1 - \cos^2 \theta \sin^2 \varphi}{\cos \theta \cos \varphi (1 - \cos \theta \sin \varphi)} = \frac{1 + \cos \theta \sin \varphi}{\cos \theta \cos \varphi}$$

$$\boxed{\operatorname{tg} \varphi' = \operatorname{tg} \varphi + \frac{1}{\cos \theta \cos \varphi}} \quad (7)$$

de (5) :

$$\operatorname{tg} \theta' = \operatorname{tg} \theta \cdot \frac{\cos \varphi'}{\cos \varphi} ;$$

de (7) :

$$\operatorname{tg}^2 \varphi' = \frac{(1 + \cos \theta \sin \varphi)^2}{\cos^2 \theta \cos^2 \varphi}$$

$$1 + \operatorname{tg}^2 \varphi' = \frac{\cos^2 \theta + 2 \cos \theta \sin \varphi + 1}{\cos^2 \theta \cos^2 \varphi}$$

donc :

$$\cos^2 \varphi' = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi'} = \frac{\cos^2 \theta \cos^2 \varphi}{\cos^2 \theta + 2 \cos \theta \sin \varphi + 1}$$

et :

$$\operatorname{tg}^2 \theta' = \operatorname{tg}^2 \theta \cdot \frac{\cos^2 \varphi'}{\cos^2 \varphi} = \operatorname{tg}^2 \theta \cdot \frac{\cos^2 \theta}{\cos^2 \theta + 2 \cos \theta \sin \varphi + 1} = \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta + 2 \cos \theta \sin \varphi + 1}$$

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{\sin \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + 2 \cos \theta \sin \varphi + 1}} \quad (8)$$

Les équations (7) et (8) définissent les valeurs des angles θ' et φ' en fonction de θ et φ , c'est-à-dire la position de la normale au miroir en fonction de la position de l'axe du système optique, ceci dans le cas général où les deux axes perpendiculaires qui déterminent les rotations sont quelconques.

B - MOUVEMENT RELATIF. CAS PARTICULIERS -

Ces deux équations qui lient la rotation du miroir à celle de l'axe optique sont trop complexes pour envisager un procédé mécanique assurant cette liaison. Le problème sera simplifié si nous utilisons des axes particuliers, par exemple en prenant comme axe Oz, un axe parallèle à l'axe de rotation de la Terre (figure 26).

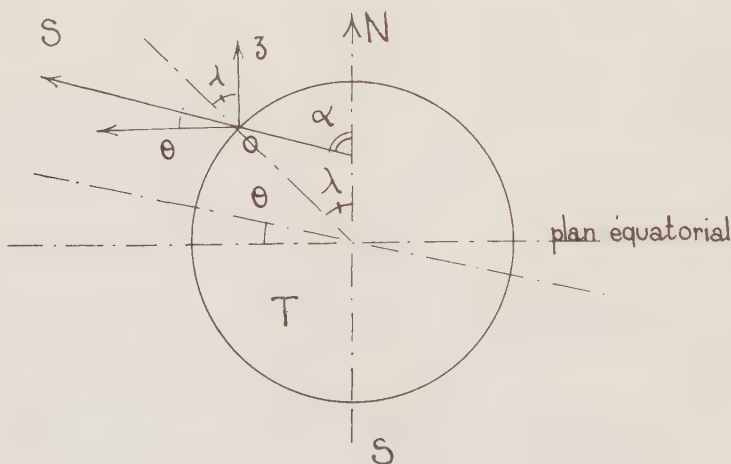


Figure 26

Le plan xoy est alors parallèle au plan équatorial et θ l'angle que fait la direction du Soleil avec ce plan devient la déclinaison du Soleil : $\theta = D$. Cet angle varie de $-23^\circ 27'$ à $+23^\circ 27'$ au cours d'une année (figure 27).

Considérons ces nouveaux axes de coordonnées Ox, Oy, Oz où Oz est parallèle à l'axe de la Terre (figure 28).

Dans ce cas l'axe optique $\overrightarrow{OS}$ décrira au cours d'une journée un cône d'axe Oz et dont la demi-ouverture est égale à $\frac{\pi}{2} - \theta = \frac{\pi}{2} - D$, D étant la déclinaison du Soleil pour la journée considérée.

Soit P un plan perpendiculaire à Oz en A (OA = a). Ce plan coupe le cône précédent suivant un cercle de centre A et de rayon $R_1 = \frac{a}{\operatorname{tg} D}$.

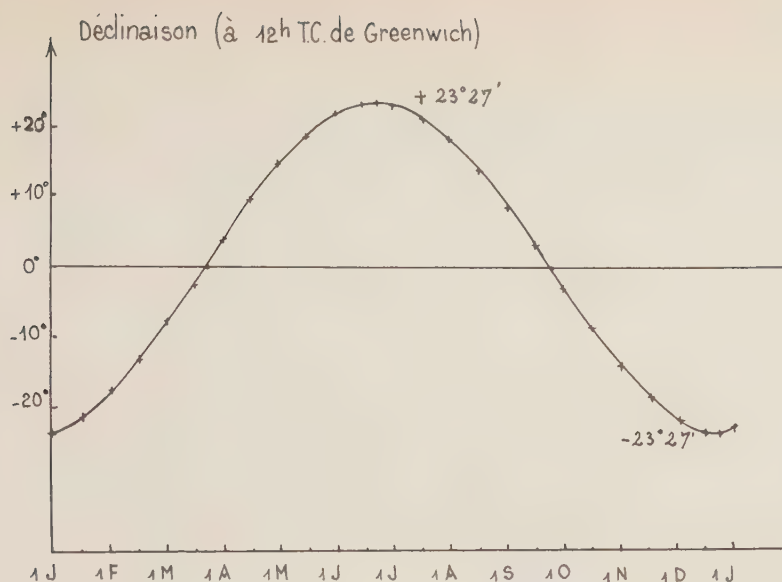


Figure 27

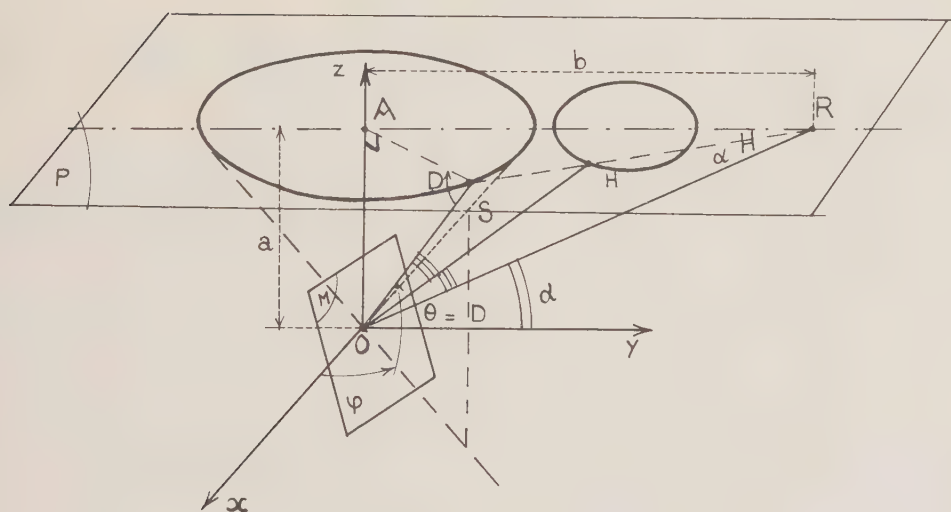


Figure 28

Prenons comme direction du rayon réfléchi par le miroir, une droite OR située dans le plan $y O z$, cette direction faisant avec l'axe Oy un angle α . OR rencontre le plan P en R. Le point R est fixe, la distance $AR = b = \frac{a}{\tan \alpha}$.

Choisissons maintenant une direction OS pour l'axe optique. Cette direction correspondant à celle du faisceau de lumière solaire incidente tombant sur le miroir ; la réflexion ayant lieu suivant OR, la normale OH au miroir M est la bissectrice de l'angle $\angle SOR$, le point H étant à l'intersection de la normale et du plan P. Dans le triangle SOR, nous avons donc :

$$\frac{HS}{HR} = \frac{OS}{OR}$$

c'est-à-dire :

$$\frac{RH}{RS} = \frac{OR}{OR + OS}$$

$$\text{OR} = \frac{a}{\sin \alpha} \quad \text{et} \quad \text{OS} = \frac{a}{\sin D}$$

$$\frac{RH}{RS} = \frac{\sin D}{\sin \alpha + \sin D} = \text{constante}$$

Dans le plan P, le point H décrira un cercle homothétique du cercle décrit par S, le rapport d'homothétie étant $\frac{\sin D}{\sin \alpha + \sin D}$ et le centre le point R déterminé par la direction du faisceau réfléchi par le miroir.

Si R_1 est le rayon du cercle décrit par S, le rayon du cercle décrit par H sera :

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{\sin D}{\sin \alpha + \sin D} = a \cdot \frac{\cos D}{\sin \alpha + \sin D}$$

et la distance des centres des deux cercles :

$$d = \frac{a \cos \alpha}{\sin \alpha + \sin D}$$

Par conséquent quand $\overrightarrow{OS}$ décrira le cône de révolution d'axe Oz, la normale au miroir décrira un cône à base elliptique dont la section par un plan perpendiculaire à Oz est un cercle, ce cercle étant homothétique de la section du premier cône par le plan considéré.

Nous avons choisi pour définir la direction du rayon réfléchi $\overrightarrow{OR}$ un angle quelconque α . Le problème de la liaison des deux rotations peut être simplifié si nous prenons pour α un angle particulier, par exemple si nous choisissons $\alpha = -D$ (figure 29).

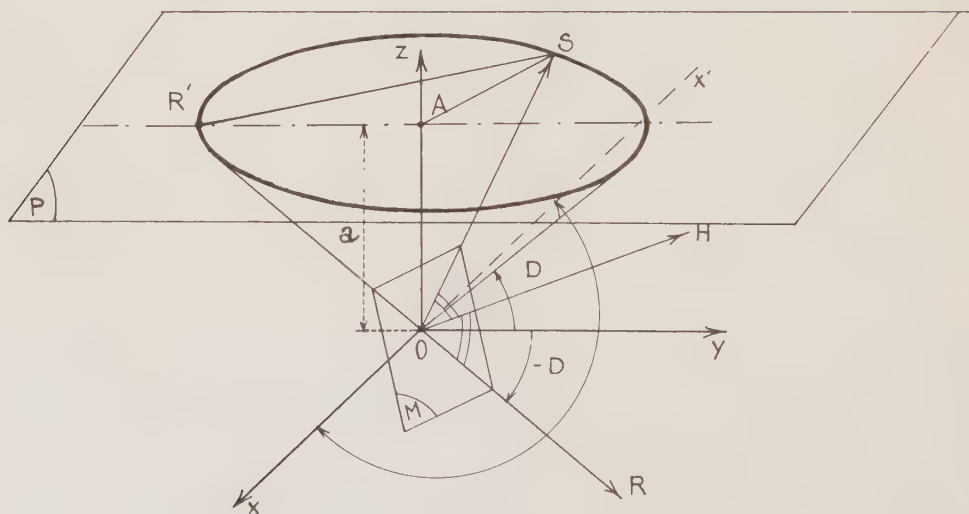


Figure 29

Dans ce cas le rayon réfléchi $\overline{OR}$ rencontre le plan P en R' sur son prolongement, R' étant sur le cercle d'intersection du cône lieu de $\overline{OS}$ par le plan P. Les droites RR' , OS et OH sont dans un même plan, $\overline{OH}$ étant la normale

au miroir, c'est-à-dire la bissectrice de l'angle défini par $\overrightarrow{OS}$ et $\overrightarrow{OR}$. $\overrightarrow{OH}$ est donc la bissectrice extérieure en O du triangle $R'OS$ isocèle ($OR' = OS$) et par conséquent se trouve être parallèle au côté opposé à O c'est-à-dire à $R'S$, droite du plan P. Ce plan étant perpendiculaire à Oz , la normale $\overrightarrow{OH}$ sera également constamment perpendiculaire à Oz et décrira le plan xOy quand $\overrightarrow{OS}$ décrira le cône de révolution d'axe Oz . Il faut remarquer que le lieu de $\overrightarrow{OH}$ n'est pas le plan xOy en entier mais seulement le demi-plan $y \geq 0$ (figure 30).

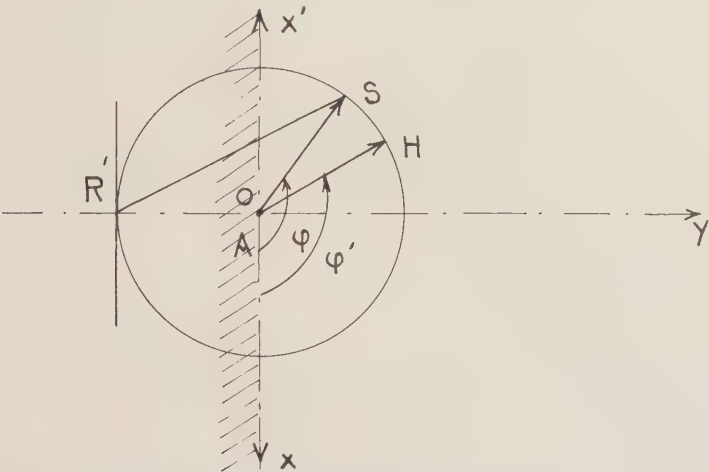


Figure 30

$\overrightarrow{OH}$ est parallèle à $R'S$, l'angle φ' qui détermine la position de la normale au miroir est donc égal à $\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}$.

Au cours d'une journée le point S décrit dans le plan P le cercle de centre O, φ variant de 0 à 2π . Quand S est en R' , la direction $R'S$ varie brusquement de π et la normale $\overrightarrow{OH}$ passe de la direction Ox' à la direction Ox . Ceci conduirait à faire subir au miroir quand le point S est en R' c'est-à-dire pour l'incidence rasante, une brusque rotation de π . Pour éviter cet inconvénient, il suffit d'utiliser un miroir réfléchissant sur ses deux faces. Ce miroir peut donc tourner autour de O d'un mouvement uniforme au cours de la journée, la vitesse de rotation étant la moitié de celle du Soleil dans son mouvement apparent autour de l'axe Oz : la durée de rotation du miroir sera donc de 48 heures.

C - DIFFERENTES REALISATIONS POSSIBLES -

Le problème de la liaison miroir-cellules est donc dans ce cas particulier extrêmement simplifié : l'axe du système optique décrivant un cône de révolution autour de Oz parallèle à l'axe de la Terre en 24 heures, le miroir tourne autour de Oz situé dans son plan, d'un mouvement uniforme, en 48 heures, les deux faces du miroir étant réfléchissantes.

La figure 31 montre la disposition des axes des deux moteurs qui commandent le déplacement du système optique, par rapport aux axes de référence choisis.

Le moteur M_2 d'axe D_2 commande la rotation du plan xOy autour de l'axe Oz . Le moteur M_1 d'axe D_1 situé dans le plan xOy supporte le dispositif optique d'axe $O'S$: il ne sert qu'à corriger les erreurs dues aux faibles écarts dans la direction de l'axe D_2 par rapport à l'axe de rotation de la Terre.

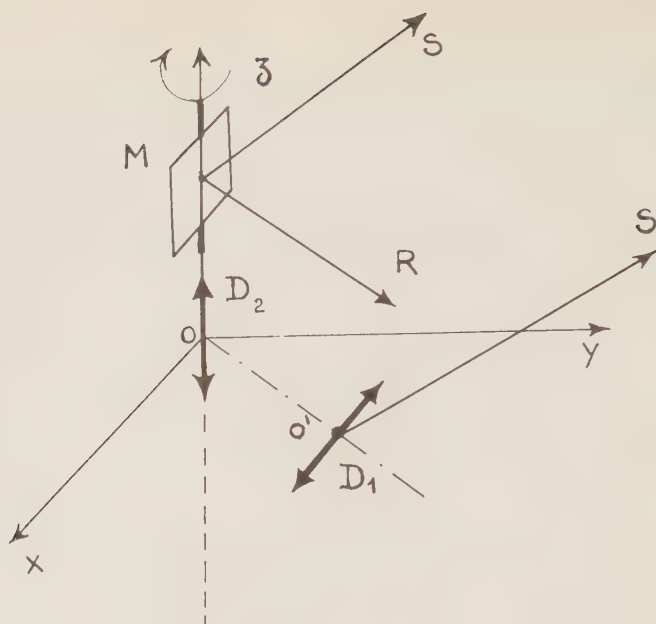


Figure 31

Le miroir M tournera donc autour de l'axe Oz c'est-à-dire de l'axe D_2 du moteur M_2 le sens de la rotation étant le même que celui du plan xOy et la vitesse angulaire la moitié de la vitesse angulaire de rotation de l'axe D_2 ce qui est facilement réalisable au point de vue mécanique, par exemple au moyen d'engrenages, le jeu entre les différents éléments de liaison étant réduit au minimum.

Dans le cas particulier que nous venons d'étudier il est nécessaire que le rayon réfléchi par le miroir fasse avec l'axe Oz un angle constant égal à $\frac{\pi}{2} + D$, D étant la déclinaison du Soleil. Les différentes directions de réflexion possibles seront donc représentées par les génératrices d'un cône d'axe Oz dont l'ouverture est $\pi - D$: ce cône est d'ailleurs le cône opposé par le sommet au cône décrit par l'axe OS , direction du Soleil. Si l'on veut obtenir une direction de réflexion différente il suffira d'utiliser un second miroir fixe recevant le faisceau de lumière réfléchi par le premier. Grâce à ce miroir, il est possible d'obtenir une direction quelconque de réflexion dans l'espace.

Pour que le fonctionnement de l'appareil ainsi réalisé soit correct nous avons vu la nécessité de déterminer avec précision la direction de l'axe Oz , ou D_2 . Ceci oblige à une mise en station préalable de l'héliostat de manière à faire coïncider rigoureusement Oz avec une parallèle à l'axe de rotation de la Terre.

Il est possible de s'affranchir de cette condition en séparant le système optique à cellules, de l'héliostat, lequel ne comporterait plus que le miroir réfléchissant et les deux moteurs. Le dispositif optique serait placé de manière fixe, par exemple sur l'appareil de mesure que l'on veut utiliser. Il recevrait une partie de la lumière réfléchie par le miroir ou par un miroir auxiliaire solidaire du précédent et commanderait par l'intermédiaire des relais, comme pour le pointeur solaire, les rotations des deux moteurs. Ces moteurs serviraient uniquement au déplacement du miroir de manière à conserver constamment une direction fixe au faisceau de lumière réfléchi, leurs axes perpendiculaires étant orientés d'une manière quelconque.

Dans ce cas, il est évidemment impossible de se servir du réglage

d'approche, seul le réglage fin est utilisé à condition que les cellules demeurent dans le champ du faisceau réfléchi par le miroir. Si un nuage ou tout autre écran masque le Soleil pendant un temps suffisant pour que les cellules ne se trouvent plus dans le champ du faisceau réfléchi après retour de la lumière, le réglage de l'héliostat deviendra impossible à moins d'une intervention manuelle.

On peut remédier à cet inconvénient en disposant une cellule (photodiode par exemple) au voisinage de l'axe du dispositif optique, cette cellule fermant un relais lorsqu'elle reçoit la lumière solaire réfléchie par le miroir.

En l'absence de lumière le relais, revenant à la position repos, commande la rotation continue des deux moteurs de manière à ce que la normale au miroir décrive un cône dont l'ouverture augmente progressivement après chaque rotation autour de l'axe vertical. Cette normale balaie donc tout l'espace et ceci jusqu'au moment où le miroir recevant à nouveau la lumière solaire incidente, celle-ci se trouve dirigée sur la cellule auxiliaire qui, provoquant l'enclenchement du relais, coupe la commande des moteurs et rétablit le circuit de commande de ces moteurs au moyen du dispositif de réglage fin.

Pour permettre une remise en service rapide de l'héliostat, il est nécessaire d'imposer au moteur une vitesse de rotation suffisamment élevée. D'autre part, il faut réduire au maximum le temps de réponse des relais de manière à éviter les oscillations de l'appareil au voisinage de l'équilibre. Dans le cas du pointeur solaire utilisé par exemple au laboratoire, le déplacement apparent du Soleil est assez lent pour permettre l'utilisation des moteurs à faible vitesse de rotation, de même les constantes de temps imposées par les cellules, les relais et par le temps de démarrage et d'arrêt des moteurs ne sont pas gênantes, à condition de rester au-dessous d'une certaine limite pour la vitesse de rotation de ces moteurs. Au contraire, si nous voulons utiliser le pointeur solaire ou l'héliostat dans des conditions telles que la base sur laquelle il repose soit elle-même mobile, il devient alors absolument nécessaire que les temps de réponse des moteurs aux signaux provenant des cellules soient extrêmement faibles, ainsi que le délai nécessaire à ces moteurs pour partir de la position de repos à la position correspondant au nouvel équilibre.

En vue de la réalisation d'un héliostat répondant à ces conditions nous allons étudier dans un troisième chapitre un nouveau dispositif pour la commande du déplacement de l'axe optique dans le cas du pointeur solaire, ou du miroir dans le cas de l'héliostat.

CHAPITRE III

NOUVEAU DISPOSITIF POUR LA COMMANDE DU POINTEUR SOLAIRE OU DE L'HÉLIOSTAT

Nous avons indiqué dans le chapitre précédent la nécessité pour ce nouveau dispositif de diminuer au maximum les constantes de temps provenant des relais et des cellules.

En particulier ce sont les relais galvanométriques qui introduisent les retards les plus longs et provoquent le pendulage des moteurs autour de la position d'équilibre. D'autre part, ce sont les seuls relais pouvant être utilisés avec des cellules à couche d'arrêt sans nécessiter une amplification préalable du courant de ces cellules. Pour leur substituer d'autres types de relais à temps de réponse plus rapide mais à sensibilité moindre on est obligé soit d'amplifier le courant des cellules, soit de remplacer ces cellules par d'autres de propriétés différentes.

A - AMPLIFICATION DU COURANT DES PHOTOPILES -

Dans le premier cas, il est assez facile de réaliser un amplificateur à transistors donnant un gain suffisant pour permettre l'utilisation de relais électromagnétiques. La figure 32 en donne un exemple.

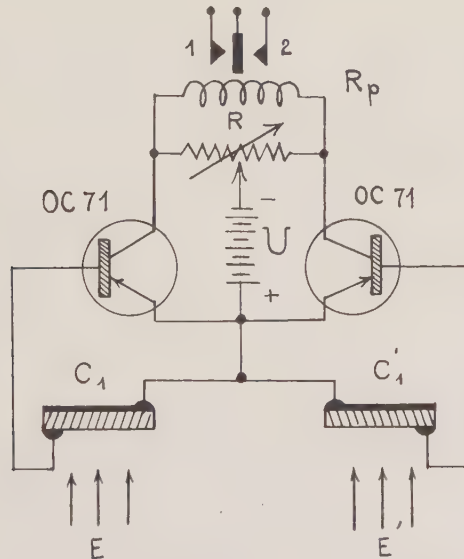


Figure 32

Les courants des deux cellules C_1 , C'_1 sont amplifiés par les deux transistors type OC 72 par exemple. Quand les deux cellules sont également éclairées la différence de potentiel aux bornes de la résistance R (de l'ordre de

10 K Ω environ) est nulle. Si l'une des deux cellules est plus éclairée que l'autre, il apparaît une tension aux bornes de R et le sens de cette tension dépend du signe de la différence d'éclairement entre C_1 et C_1' . Le montage potentiométrique de la tension d'alimentation $\mathcal{U}$ des deux transistors avec R, permet d'obtenir le réglage exact de l'équilibre lorsque les cellules sont également éclairées. Un relais polarisé type "relais télégraphique" est connecté aux bornes de R et établit un contact en 1 ou en 2 suivant le sens de la tension apparaissant aux bornes de R par suite du déséquilibre dans l'éclairement de (C_1 , C_2). Ce relais polarisé commandera à son tour la rotation du moteur correspondant au couple de cellules (C_1 , C_2) dans un sens ou dans l'autre suivant que le contact a lieu en 1 ou en 2.

B - CARACTERISTIQUES DES NOUVEAUX RELAIS -

Nous avons choisi un relais télégraphique polarisé type C de la "C.S.F.". La puissance de commande de ces relais peut se limiter à 50 microwatts tout en conservant un fort pouvoir de coupure de l'ordre de 2 Ampères sous 100 volts, la durée de vie étant supérieure à 10 millions de coupures. Deux autres caractéristiques importantes pour le problème posé sont le temps de réponse et le temps de passage. Le temps de réponse est le temps qui s'écoule entre l'application du signal d'excitation et l'instant où l'armature ferme un contact et le temps de passage celui mis par l'armature mobile pour passer de la position repos à la position travail.

Ces temps de réponse et de passage dépendent :

- des caractéristiques de la bobine et du circuit d'excitation.
- de l'amplitude du signal d'excitation et du réglage particulier du relais.

Pour le relais utilisé ici : relais à repos milieu, le temps de réponse est de l'ordre de 6 millisecondes ; ce temps de réponse est très inférieur à celui des relais galvanométriques employés dans la commande du pointeur solaire (environ 1/2 seconde). Le choix des moteurs devient alors un problème important. En effet si l'on veut bénéficier au maximum de la rapidité de fonctionnement des relais, il faut éviter d'utiliser des moteurs dont l'inertie au démarrage et surtout à l'arrêt limite les vitesses de rotation, afin d'empêcher le pendulage de l'axe optique ou du miroir de l'héliostat autour de la position d'équilibre. Les moteurs servant à la commande du pointeur solaire décrit au chapitre I ne peuvent convenir ici, les durées de rotations pour les axes D_1 et D_2 devant toujours être inférieures à 1 tour par seconde. Notre choix s'est alors fixé sur les moteurs "Servalco" qui sont des moteurs à induit plat et bobinage imprimé basés sur le principe de l'anneau de Gramme et de la roue de Barlow.

C - CARACTERISTIQUES DES MOTEURS "SERVALCO" -

L'induit à bobinage imprimé se présente sous l'aspect d'un disque mince ajouré en anneau. Sur chaque face de l'anneau apparaissent les conducteurs lamellaires en cuivre nu dont les portions radiales constituent la partie active de l'induit. Le collecteur est supprimé et la piste des balais est sur le disque lui-même. L'inducteur se compose de deux anneaux fixes en fer de Suède et d'aimants Ticonal avec leurs épanouissements polaires en forme de segments d'anneau. Cet ensemble peut d'ailleurs être remplacé par un anneau de ferrite dure magnétique, l'induction dans l'entrefer atteint 4 à 6 000 gauss. Ce moteur ayant un entrefer rigoureusement lisse il n'y a aucune modulation du couple moteur et l'absence de fer dans l'induit rend sa self-induction pratiquement nulle. De ceci résulte une très bonne qualité de commutation et une usure extrêmement faible des balais due à l'absence d'étincelles.

Enfin ce moteur est susceptible de posséder un amortissement interne, c'est-à-dire un couple résistant proportionnel à la vitesse. Cet amortissement est obtenu directement sur le moteur en donnant une certaine conductivité au disque support du bobinage induit, par exemple en utilisant de l'aluminium. Les courants de Foucault induits dans le disque par le champ inducteur donnent en effet un couple de freinage proportionnel à la vitesse. Cet amortissement est nécessaire dans les chaînes de servo-mécanismes et permet ainsi l'utilisation du moteur sans l'intermédiaire d'un réducteur c'est-à-dire en attaque directe. En général ces moteurs existent en deux variantes qui correspondent à 2 induits l'une à faible, l'autre à fort poids de cuivre. Le premier à forte résistance interne et muni d'un amortissement peut être employé dans les servo-mécanismes soumis à des impulsions rapides : il semble donc pouvoir convenir pour la commande de l'héliostat en permettant d'obtenir la position d'équilibre dans un délai très court.

Une autre caractéristique intéressante des moteurs "Servalco" est la suivante : fonctionnant sous des tensions continues relativement basses, il est essentiel de disposer de sources d'alimentation à très faible impédance interne : l'utilisation de transistors est donc particulièrement indiquée.

En résumé la solution du problème posé dans ce chapitre peut être grandement facilitée par l'emploi des moteurs "Servalco", grâce essentiellement à leur faible constante de temps, leur couple élevé sous des dimensions réduites, leur alimentation permettant leur commande directe à la sortie d'un amplificateur à transistors, les relais pouvant être remplacés par des transistors thyatron au silicium dont la vitesse de commutation est supérieure à celle des relais électromagnétiques. De ces différents avantages il résultera une diminution importante des dimensions de l'ensemble de l'appareil et du poids de celui-ci. L'alimentation des moteurs en courant continu au moyen d'accumulateurs spéciaux et des amplificateurs à transistors au moyen de piles, le rend indépendant de toute source de tension extérieure, les différentes alimentations se trouvant incorporées dans l'appareil même.

D - MODIFICATIONS DU DISPOSITIF OPTIQUE -

Jusqu'ici nous n'avons rien changé au dispositif optique. Il est toujours composé de 8 cellules à couche d'arrêt de 11×18 mm rectangulaires, quatre d'entre-elles servant au réglage d'approche, les quatre autres étant utilisées pour le réglage fin. Nous pouvons envisager de le modifier en cherchant à remplacer les cellules à couche d'arrêt par d'autres cellules de sensibilité au moins égale et dont les dimensions plus réduites permettraient une réduction appréciable des dimensions de ce dispositif optique.

Notre choix s'est alors porté sur les photodiodes au germanium analogues à celle utilisée dans le pointeur solaire pour la commande du relais de mise hors circuit du dispositif de réglage d'approche. Pour justifier leur emploi, nous allons indiquer quelques unes de leurs propriétés. Celles-ci se rapportent à la photodiode au germanium à jonction p-n par alliage (OAP 12) de la "Radiotechnique".

Les dimensions de ces cellules sont très réduites : de forme cylindrique, la longueur étant de 10 mm environ et le diamètre de 3 mm, ce qui correspond à une surface sensible, circulaire, de 1 mm^2 .

La sensibilité est supérieure à $5 \mu\text{A}$ pour un éclairement de 100 lux (lumière blanche) avec une réponse spectrale présentant un maximum pour $1,55 \mu$ de longueur d'onde, le seuil se situant vers 2μ (figure 33).

Convenablement polarisée (tension max : 30 V) cette cellule laisse circuler un courant qui croît avec l'éclairement, le courant de saturation étant pratiquement indépendant de la tension appliquée. La puissance maximum pouvant être dissipée sur le collecteur est de 30 mW, le courant inverse ne devant pas dépasser 3 mA.

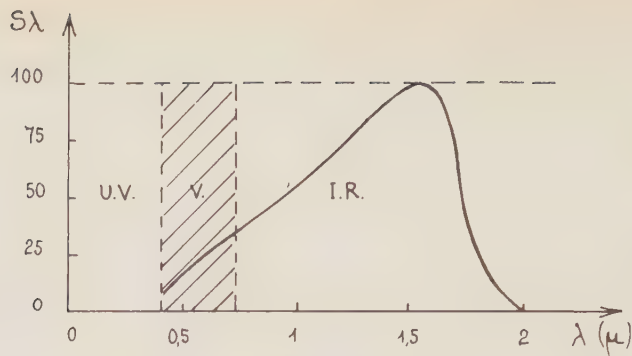


Figure 33

Si nous comparons la photodiode avec la cellule à couche d'arrêt précédemment utilisée nous constatons que leurs sensibilités en lumière blanche sont à peu près équivalentes : $50 \mu A/1\ 000$ lux pour la photodiode et $60 \mu A/1\ 000$ lux pour la photopile en tenant compte de la résistance du circuit extérieur. Pour des éclaircissements supérieurs, la sensibilité de la photopile qui dépend de cet éclaircissement, peut devenir inférieure à celle de la photodiode.

Nous remarquons également que la réponse spectrale pour la photodiode est décalée vers l'infra-rouge par rapport à celle de la cellule à couche d'arrêt, les maxima se situant pour la première à $1,55 \mu$ et pour la seconde à $0,58 \mu$ environ.

De ceci résulte un avantage quant à l'utilisation des photodiodes pour le pointeur solaire : elles permettront à celui-ci de suivre le déplacement apparent du Soleil à travers un voile nuageux, le rayonnement infra-rouge qui le traverse étant suffisant pour obtenir la commande de l'appareil.

Enfin, il est possible de leur adapter un amplificateur à transistors comme dans le cas des cellules à couche d'arrêt, le gain obtenu étant d'ailleurs supérieur dans le cas des photodiodes. Ceci présente ici un grand intérêt aussi bien pour le choix du relais que pour la limitation du courant de cellule celui-ci ne devant pas dépasser une valeur maximum sous peine de détruire la jonction de la photodiode.

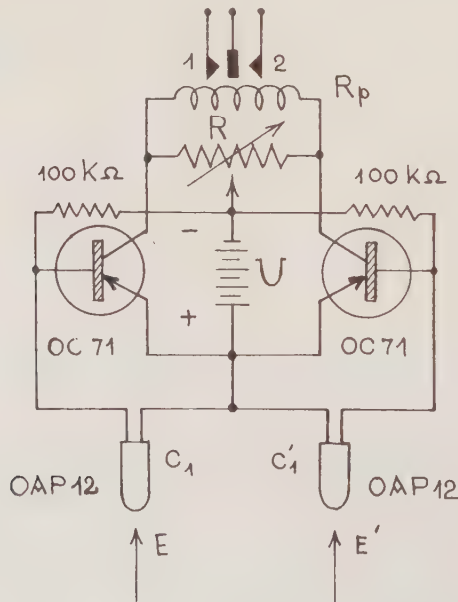


Figure 34

La figure 34 représente un amplificateur différentiel à courant continu qui comporte deux transistors OC 71 disposés symétriquement en émetteurs communs avec attaque symétrique par les deux bases. Les deux cellules OAP 12 sont polarisées par la batterie commune qui alimente aussi les transistors. Grâce au potentiomètre R_p , on obtient la compensation du courant résiduel et des effets de température des transistors et des photodiodes ainsi que celle des différences très faibles entre les courants d'obscurité des photodiodes. Le relais R_p est du même type que celui utilisé dans le cas des cellules à couche d'arrêt ; il établit également un contact en 1 ou en 2 suivant le sens de la différence d'éclairement entre les deux photodiodes C_1 et C'_1 .

Suivant que le contact du point milieu du relai R_p aura lieu en 1 ou en 2, le moteur correspondant à (C_1, C'_1) tournera dans un sens ou dans l'autre afin de rétablir l'équilibre d'éclairement des deux cellules C_1 et C'_1 .

Il nous est possible maintenant de présenter un schéma du nouveau dispositif de commande du pointeur solaire ou de l'héliostat (figure 35).

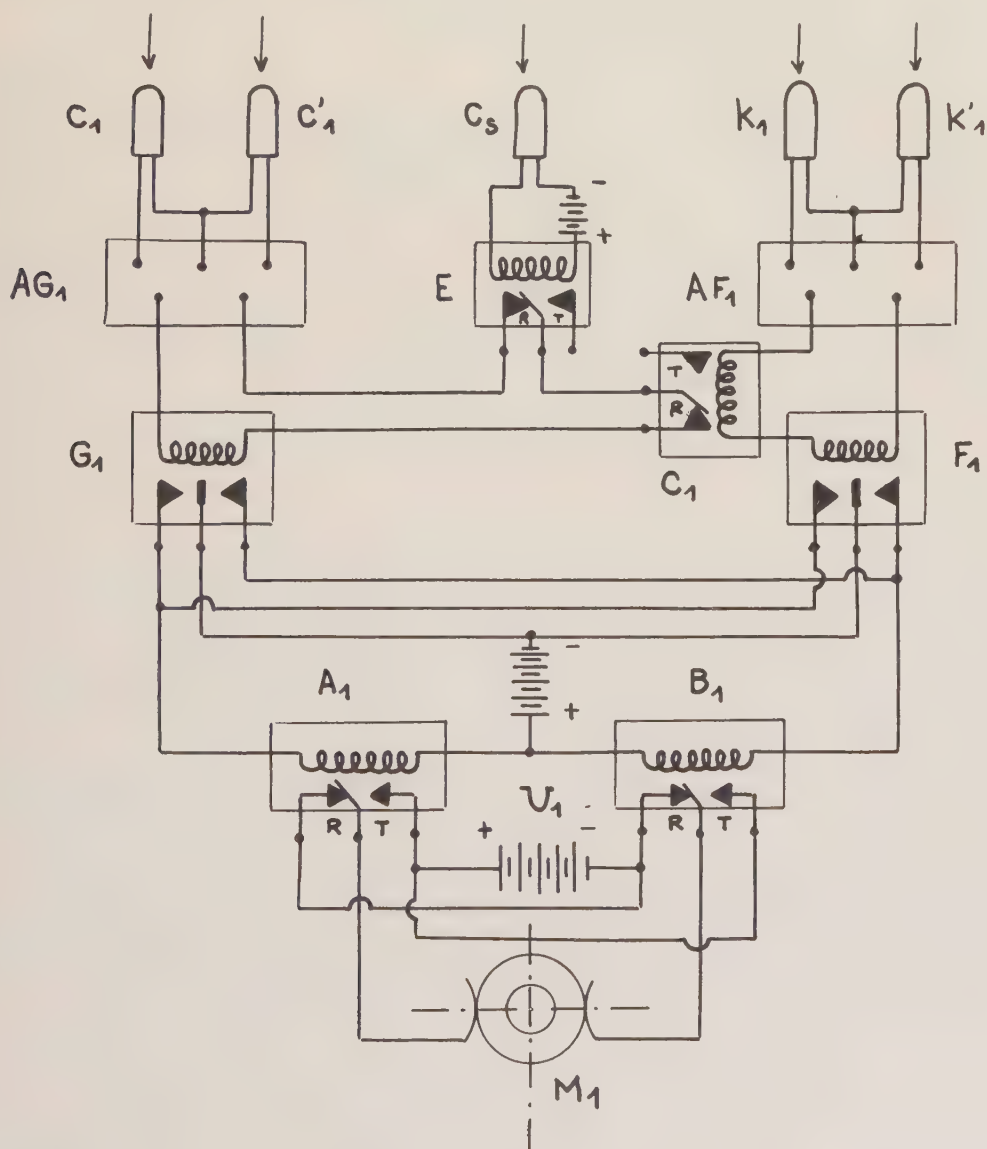


Figure 35

Le principe de ce dispositif restera le même qu'au chapitre I, seuls les éléments le composant seront changés : les 8 cellules à couche d'arrêt du système optique sont remplacées par 8 photodiodes au germanium également associées par couples (C_1, C'_1) , (C_2, C'_2) pour le réglage d'approche (K_1, K'_1) , (K_2, K'_2) pour le réglage fin. Chacun de ces couples commande un relais (genre relais télégraphique) par l'intermédiaire de l'amplificateur à transistors décrit plus haut.

Les relais polarisés assurent à leur tour la rotation des moteurs M_1 et M_2 dans le sens convenable afin de maintenir constamment le dispositif optique à l'équilibre. Il n'est plus nécessaire ici de diminuer la vitesse de rotation des moteurs quand on passe du réglage d'approche au réglage fin, ceci grâce à la réduction des constantes de temps obtenue par les nouveaux relais et les moteurs "Servalco". Enfin les circuits auxiliaires seront conservés, en particulier ceux concernant l'interruption du dispositif de réglage d'approche quand le réglage fin est en jeu ou, quand l'équilibre complet est atteint. Il sera également nécessaire d'utiliser deux relais auxiliaires pour la commande de chaque moteur, ces relais étant placés à la suite des relais polarisés.

(C_1, C'_1) : photodiodes de réglage d'approche,

(K_1, K'_1) : photodiodes de réglage fin,

Cs : photodiode supplémentaire qui par l'intermédiaire du relai E supprime le réglage d'approche quand l'appareil est à l'équilibre.

AG_1 et AF_1 : amplificateurs différentiels à transistors.

G_1 : relais télégraphique polarisé type C pour réglage d'approche.

F_1 : relais identique à G_1 .

C_1 : relais auxiliaire évitant le fonctionnement simultané des deux réglages.

A_1 et B_1 : relais auxiliaires pour la commande du moteur M_1 .

U_1 : source de tension continue alimentant M_1 .

Le schéma de la figure 35 est également valable pour le moteur M_2 .

E - CONCLUSION -

Les étapes successives de cette étude nous ont montré d'une part la possibilité de réaliser un pointeur solaire de grande précision évitant tous les inconvénients d'une mise en station rigoureuse : un tel dispositif a été construit permettant d'orienter constamment vers le Soleil un appareil de mesure, en particulier un appareil pour la mesure continue de l'épaisseur d'eau condensable contenue dans l'atmosphère, lequel a été également étudié et réalisé au Laboratoire de Physique de l'Atmosphère.

D'autre part, par une miniaturisation des différents éléments constituant le pointeur solaire ou l'héliostat qui en est dérivé, il est possible d'obtenir une diminution appréciable de l'encombrement et du poids de ces appareils.

L'emploi de nouveaux relais et de moteurs spéciaux permet d'obtenir une réduction importante des temps de réponse, ce qui assure ainsi l'équilibre de l'appareil dans un temps très court. Ceci présentera un grand intérêt quand la base même de l'appareil est mobile dans l'espace, par exemple dans le cas où celui-ci sera utilisé à bord d'un ballon sonde ou d'une fusée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. BLET - Les photopiles au sélénium, Paris, 1959.
- [2] G. BLET - Recherches théoriques et pratiques sur les cellules photo-électriques à couche d'arrêt, Mesures, 200, 1954, p. 11.

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

LES FILTRES OPTIQUES

Vu et approuvé :
Paris, le 12 septembre 1963
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
Marc ZAMANSKY

Vu
et Permis d'imprimer :
Le Recteur de l'Académie de Paris,
Jean ROCHE

IMP. LOUIS-JEAN — GAP

Dépôt légal n° 191 — 1964

